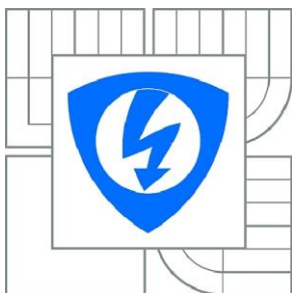




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DEMO APLIKACE MATICOVÉHO INFRAČERVENÉHO SENZORU

INFRARED ARRAY SENSOR DEMO APPLICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

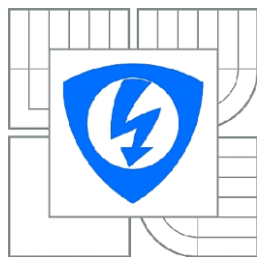
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MAŇAS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK FEDRA, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Ondřej Maňas

ID: 134357

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Demo aplikace maticového infračerveného senzoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi maticového IR senzoru 8x8 Grid-EYE. Prostudujte jeho komunikační rozhraní a možnosti. Navrhněte zapojení s mikrokontrolerem pro vizualizaci dat (barevný display) a pro zasilání dat do PC (USB rozhraní).

Sestavte navrhované zařízení s možností přímého zobrazení dat ze senzoru i odesílání dat do PC. Při připojení k PC využijte napájení po USB. Otestujte dosažitelné přesnosti senzoru a možnosti jeho využití.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. BEN - technická literatura, Praha, 2003.

[2] MANN, B. C pro mikrokontroléry. BEN - technická literatura, Praha, 2003.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb

ABSTRAKT

Cílem mé bakalářské práce je návrh a konstrukce aplikací založených na možnostech zvoleného maticového termoelektrického senzoru AMG88xx od firmy Panasonic. Potencionální aplikace s tímto senzorem dokážou sledovat tepelnou stopu pohyblivých objektu a zpracovávat ji. Práce se dále zabývá možnostmi implementace těchto aplikací do různých odvětví lidské činnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

maticový infračervený senzor, Grid-EYE, TFT LCD, USB, AVR, řízení mikroprocesorem

ABSTRACT

The aim of my bachelor's thesis is a design applications based on properties of chosen matrix thermopile sensor AMG88xx by Panasonic. Potential applications with this sensor can detect a temperature map of moving objects and processing that. This thesis also engages in properties of implementation these applications to assorted of human activities.

KEYWORDS

matrix infrared sensor, Grid-EYE, TFT LCD, USB, AVR, driving by microprocessor

MAŇAS, O. *Demo aplikace maticového infračerveného senzoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Demo aplikace maticového infračerveného senzoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval společnosti CSRC s.r.o za zapůjčení senzoru Grid-EyE.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Grid-EYE	2
1.1 Princip vnitřního zapojení GE	2
1.2 Teploty jako data	2
1.2.1 Twice moving average	3
1.3 Závislost teplotní citlivosti senzoru na vzdálenosti	3
1.4 GE jako zdroj přerušení	5
1.5 Doporučené vnější zapojení GE	5
2 Komunikace GE s okolními zařízeními	7
2.1 Sběrnice I2C	7
2.1.1 Základní popis protokolu I2C [3]	7
2.1.2 Výměna dat na I2C	8
2.1.3 Kontinuální režim I2C	8
2.1.4 Programové vybavení pro Master	9
2.2 Časová analýza komunikace po I2C	10
2.3 Komunikace s PC přes sběrnici USB	11
2.3.1 Popis topologie sběrnice USB a normy komunikace	11
2.3.2 Časová analýza přenosu dat protokolu USB	11
2.4 Realizace komunikace po USB	12
2.4.1 Obvody FTDI	12
2.4.2 AVR s Hardwarovou implementací USB	12
2.4.3 Softwarová Implementace protokolu USB	13
2.4.4 Získání dat a jejich zpracování v PC	13
3 Vizualizace dat	14
3.1 Maticový RG led display 8x8	14
3.1.1 Zobrazení výstupu senzoru GE	14

3.2	Barevný grafický LCD displej ITDB02.....	14
3.2.1	Popis vstupně výstupních pinů ITDB02	15
3.2.2	Knihovny funkcí pro ITDB02.....	15
4	Volba Mikrokontroléru a návrh blokového zapojení	17
4.1	Souhrn požadovaných parametrů.....	17
4.2	Možnosti struktury zapojení	17
4.3	Volba mikrokontroléru a návrh blokového schéma zapojení	18
4.4	Blokový návrh napájecí části	20
4.4.1	Volba akumulátoru a jeho příslušenství.....	20
4.4.2	Selektivita napájecích zdrojů a stabilizace napětí.....	21
4.4.3	Výsledné blokové schéma napájecí části.....	21
5	Software aplikace	23
5.1	Grafické zobrazení naměřených dat	23
5.1.1	Přepočítání absolutních hodnot teploty na grafickou reprezentaci	24
5.1.2	Číslkové zpracování obrazu a jeho zobrazení.....	25
5.2	Uživatelské menu řízené dotykovou vrstvou.....	26
5.3	Matlabovské GUI a jeho komunikace s MCU.....	28
5.3.1	PC mód	28
5.3.2	Seznámení s Graphical user interface	29
5.3.3	Popis softwarového vybavení GUI.....	31
5.4	Ukazatel výdrže baterie	32
6	Konstrukce zařízení a měření	33
6.1	Návrh schématického zapojení	33
6.1.1	Návrh zapojení digitální části	33
6.1.2	Návrh zapojení napájecí části	33
6.2	Návrh plošného spoje a osazení do krabičky.....	34
6.2.1	Návrh DPS	34
6.3	Měření.....	34
6.3.1	Doba zpracování a zobrazení data přijatých z Grid-EyE.....	35
6.3.2	Naměřené parametry napájecí části	35
6.3.3	Měření na senzoru Grid-EyE	36
7	Závěr	37

Literatura	38
Seznam symbolů, veličin a zkratk	40
Seznam příloh	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Blokové schéma senzoru Grid-Eye [1].	2
Obrázek 2: Závislost velikosti zorné plochy elementu na vzdálenosti. Hodnoty v hranatých závorkách určují vzdálenost od jednoho elementu GE senzoru. Velikost černého objektu je 270 mm x 680 mm [2].	4
Obrázek 3: Schéma zapojení senzoru GE doporučeného výrobcem [1].	6
Obrázek 4: Průběh zápisu dat, do zařízení Slave [3].	8
Obrázek 5: Grafické znázornění čtení dat z registru zařízení Slave po sběrnici I2C.	8
Obrázek 6: Grafické znázornění zápisu dat do registru zařízení Slave po sběrnici I2C... 8	
Obrázek 7: Grafické znázornění kontinuálního režimu sběrnice I2C při čtení.	9
Obrázek 8: Popis pinů patice TFT-40. Označené vývody je třeba připojit ke kontroléru [10].	15
Obrázek 9: Fotka modulu s PL2303HX	18
Obrázek 10: Blokové schéma zapojení Demo aplikace se senzorem GE.....	19
Obrázek 11: Zapojení napájení z USB a akumulátoru přes dvě Schottkyho diody.....	21
Obrázek 12: Blokové schéma napájecí části výsledné aplikace.	22
Obrázek 13: Vývojový digram popisující hlavní smyčku programu.....	23
Obrázek 14: Ukázka grafického teplotního pole i s absolutními hodnotami teplot (Matlab GUI).	24
Obrázek 15: Závislost pořadí vzorku na změřené teplotě stejného objektu.	25
Obrázek 16: Náznak výpočtu nové matice podle lineární interpolace.	26
Obrázek 17: Vyfotografovaný snímek LCD po vstupu do menu. Červenou barvou jsou naznačeny zóny stisknutí pro jednotlivá softwarová tlačítka.	26
Obrázek 18: Konečný vzhled grafického uživatelského prostředí.	30
Obrázek 19: Závislost naměřené t_{PM} na vzdálenosti GE a figuranta.	36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přepočty základních teplot z binární soustavy [1].....	3
Tabulka 2: Seznam funkcí knihovny pro komunikaci I2C [4]	9
Tabulka 3: Tabulka vypočítaných hodnot časových úseků při přenosu dat.	10
Tabulka 4: Souhrn rychlostí přenosu dat jednotlivých tříd USB.....	11
Tabulka 5: Schéma komunikace podle protokolů USB.....	12
Tabulka 6: Seznam výhod a nevýhod řadiče FTDI.[8].....	12
Tabulka 7: Seznam výhod a nevýhod Kontrolérů Atmel s řadiči USB [8].	13
Tabulka 8: Seznam výhod a nevýhod Softwarové implementace USB řadiče.[8].....	13
Tabulka 9: Souhrn nároků kladených na mikrokontrolér	17
Tabulka 10: Relativní srovnání variant zapojení v základních kategoriích.....	18
Tabulka 11: Přidělení pinů MCU jednotlivým blokům zapojení viz Obrázek 9.	19
Tabulka 12: Přehled udávaných odběrů proudu jednotlivých obvodů.	20
Tabulka 13: Přehled dostupných funkcí v menu	28
Tabulka 14: Popis reakce kontroléru na 1. Byte vyslaný z PC v rámci komunikačního protokolu.....	29
Tabulka 15: Popis funkcí v okně Screen control	31
Tabulka 16: Hodnoty napětí aproximované vybíjecí křivky akumulátoru přepočteny na digitální ekvivalent. (V_{ak} je hodnot napětí na akumulátoru).....	32
Tabulka 17: Doba zpracování a zobrazení dat.....	35
Tabulka 18 Naměřené parametry napájecí části.	35

ÚVOD

Ve světě jsou již známé bezdotyková tepelná čidla, pracující na bázi snímání infračerveného světla. Jedny z hojně používaných čidel jsou pyroelektrické senzory, ty měří pouze relativní změnu teploty. Radiační pyrometrické senzory s jedním elementem sice mohou změřit absolutní hodnotu, tudíž i náhlou změnu teplot, ale jedná se pouze o jednorozměrnou veličinu, ze které se nedá určit směr a rychlost objektu. Senzor, který se stal hlavním tématem této práce, se skládá z více radiačně pyrometrických elementů – jsme schopni zjistit směr pohybu objektu, jeho rychlost a relativní vzdálenost mezi objekty.

Firma Panasonic vyvinula novou koncepci teplotních senzorů na bázi SMT obecně zvaná “Grid-Eye”. Tudíž máme přijímač infračerveného záření, který zaznamenává teplotu v 64 bodech (AMG88xx). Senzor vykresluje teplotní mapu prostoru nacházejícím se v jeho zorném poli. Navíc výrobce udává, že za určitých podmínek dokáže tento senzor rozpoznat objekt o přibližné velikosti lidské postavy na vzdálenost 5 m. Podle výrobce by měl zmiňovaný senzor najít široké uplatnění v náročnějších aplikacích určených ke sledování teploty živých i neživých objektů. Například aplikace na počítání osob, ochrana majetku, automatizace budov, měření teploty a protipožární systémy.

V současné době pořízení jednotlivých kusů GE senzorů je monitorováno evropským kontrolním úřadem pro export. Evropská komise označila Grid-Eye za “Dual use article”, z čehož plyne zákaz použití v aplikacích určených pro armádní sektor. Tudíž tento druh aplikací nebude v této práci více zmiňován.

1 GRID-EYE

Tato kapitola je věnována infračervenému maticovému senzoru “Grid-EYE” (dále jen GE). Jsou zde popsány základní parametry zařízení a jeho funkce.

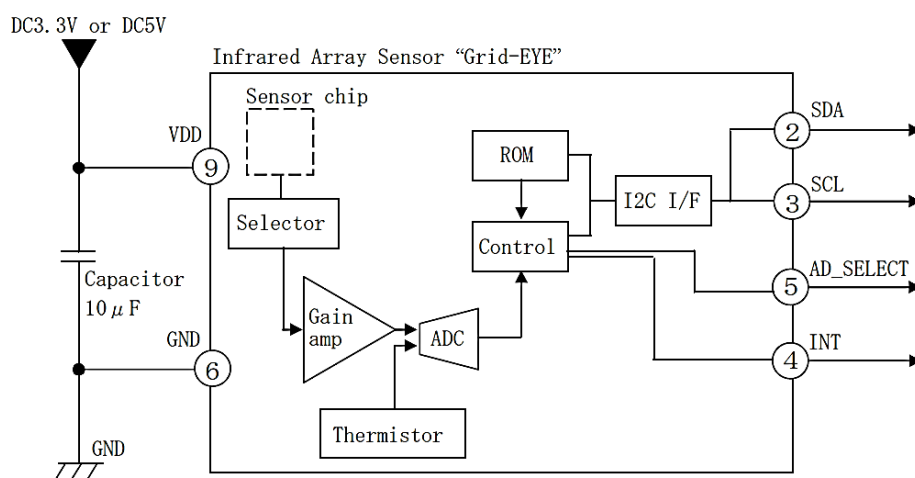
1.1 Princip vnitřního zapojení GE

Infračervené paprsky o různé vlnové délce dopadají na infrathermočlánky zhotovené z křemíku na bázi MEMS. Technologie zvaná MEMS propojuje v rámci jednotek mikrometrů mechanické a elektrické prvky. Na výstupu získáme napětí úměrné frekvenci infračerveného světla.

Selektorem vybereme konkrétní buňku z matice, zesílíme a přivedeme do AD převodníku.

Senzor, kromě infrathermočlánku, také obsahuje kontaktní termistor NTC, který zaznamenává teplotu pouzdra senzoru. Je totiž nutné provádět kompenzaci vlivu okolní teploty na hodnoty naměřené IR senzory. Tato kompenzace se provádí digitálně v bloku Control. Z obrázku 1 je vidět, že tento blok řídí chod celého obvodu. Zejména komunikaci I2C a systém generování přerušení.

V paměti ROM je uloženo 24 přístupných řídicích registrů a 130 datových registrů.



Obrázek 1: Blokové schéma senzoru Grid-Eye [1].

1.2 Teploty jako data

Výrobce nabízí čtyři provedení, které jsou rozděleny na dvě skupiny. První skupina se dělí podle napájecího napětí, druhá podle rozsahu měřených teplot. Verze s větším rozsahem však nedosahuje takové přesnosti měření.

Senzor snímá teplotu na 64 míst matice 8x8. Tyto teploty jsou převedeny jako dvojkový doplněk na 12bitovou hodnotu, kde MSB určuje, zda je hodnota kladná, nebo záporná. Rozlišení je 0,25° C. Při převodu zpět na výslednou teplotu je postup následující: Pokud je hodnota kladná, stačí binární číslo převést na dekadické a vynásobit rozlišením. Je-li teplota záporná. Musíme binární číslo nejprve znegovat, poté incrementovat a vynásobit rozlišením. Pro názornou ukázkou byla přiložena Tabulka 1 obsahující základní teploty přepočtené z binární soustavy.

Tabulka 1: Přepočty základních teplot z binární soustavy [1]

Teplota [°C]	binární číslo	HEX číslo
125	0001_1111_0100	0x1F4
25	0000_0110_0100	0x064
0,25	0000_0000_0001	0x001
0	0000_0000_0000	0x000
-0,25	1111_1111_1111	0xFFFF
-25	1111_1001_1100	0xF9C
-55	1111_0010_0100	0xF24

Ve zbytku kapitoly bude slovem „teplota” označen binární ekvivalent skutečné teploty (v °C). Každá teplota z matice 8x8 je uložena ve dvou paměťových registrech. Z toho plyne, že GE obsahuje 128 paměťových registrů s teplotami. Logika senzoru GE tyto registry přepisuje automaticky podle zvoleného počtu snímků za sekundu, to lze nastavit na 1 FPS nebo 10 FPS.

1.2.1 Twice moving average

Senzor GE také obsahuje integrovaný postprocessing, který zpracovává teploty. V literatuře [1] je nazýván jako “Twice moving average”. Výpočet je prováděn pro každý pixel jednotlivě. Činnost je zřejmá z rovnice (1). Tato funkce senzoru je nastavitelná v příslušném interním registru. Příznakový bit určuje, zda-li je aktivní.

$$V_{avg}(t) = \frac{\{V_{OUT}(t) + V_{avg}(t-1)\}}{2} \quad (1)$$

V_{avg} je výstupní hodnota postprocessingu,

V_{OUT} je vstupní hodnota změřené teploty,

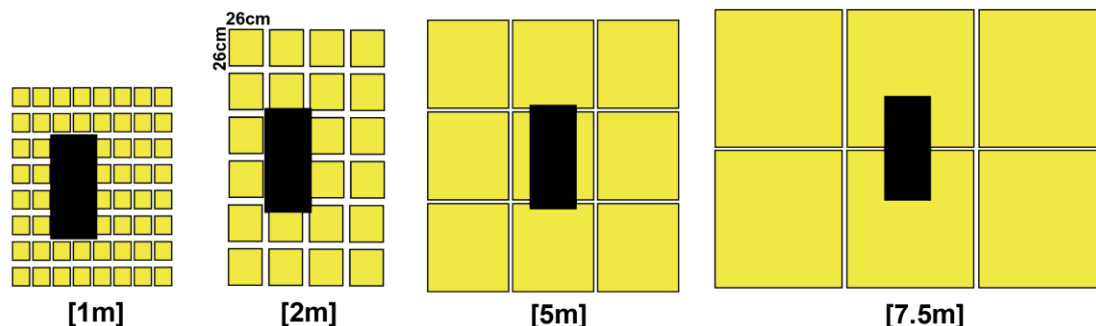
t je diskretní hodnota času.

1.3 Závislost teplotní citlivosti senzoru na vzdálenosti

Jak už bylo řečeno, GE obsahuje matici obsahující 64 thermoradiačních elementů a každý element má zorný úhel přibližně 7,5°. S rostoucí vzdáleností se sledovaný objekt opticky zmenšuje, až jeho vyzářená teplota splyne s okolní teplotou.

Se vzdáleností také roste útlum prostředí, který je v této kapitole zanedbán.

Obrázek 2 znázorňuje závislost velikosti zorné plochy elementu na vzdálenosti, a také jak se sledovaný objekt vůči této ploše zmenšuje.



Obrázek 2: Závislost velikosti zorné plochy elementu na vzdálenosti. Hodnoty v hranatých závorkách určují vzdálenost od jednoho elementu GE senzoru. Velikost černého objektu je 270 mm x 680 mm [2].

Teploty zachycené jedním elementem se dají zjednodušeně vyjádřit podle (2). Tato rovnice platí pouze v případě, že teplota pozadí je nižší než teplota sledovaného objektu. K vyřešení (2) je nutné znát závislost optické plochy na vzdálenosti od senzoru. Tato závislost je uvedena v (3), která plyne z goniometrických funkcí. Plocha sledovaného objektu je kolmá na směřnici elementu.

$$t_z = (t_o - t_p) * \frac{S_o}{S_c} + t_p, \quad (2)$$

t_z je teplota změřená elementem,

t_o je teplota sledovaného objektu,

t_p je teplota pozadí za sledovaným objektem,

S_o je skutečná plocha sledovaného objektu,

S_c je optická plocha zorného pole.

$$S_c = (2 * \tan\left(\frac{7,5}{2}\right) * l)^2, \quad (3)$$

l je vzdálenost plochy od senzoru.

Výrobce udává, že senzor GE je schopen zachytit objekt o rozměrech 700 mm x 250 mm na vzdálenost 5 m, pokud je rozdíl teplot objektu a pozadí 4° C. Toto tvrzení ověříme výpočtem z (2) a (3). Zvolíme teploty $t_o=30^\circ \text{ C}$ a $t_p=26^\circ \text{ C}$.

Výpočet optické plochy vzdálené $l=5 \text{ m}$:

$$S_c = (2 * \tan\left(\frac{7,5}{2}\right) * 5)^2 = 0,429 \text{ m}^2$$

Strana optické plochy se rovná 655,4 mm. Tato strana je menší než delší strana sledovaného objektu. To znamená, že celé těleso se “nevejde” do zorného pole jednoho elementu. Tudíž element “uvidí” těleso o rozměrech 655,4 mm x 250 mm.

Výpočet změřené teploty t_z elementem senzoru GE pomocí (2):

$$t_z = (t_o - t_p) * \frac{S_o}{S_c} + t_p$$

$$t_z = (30 - 26) * \frac{(0,6554 * 0,250)}{0,4295} + 26 = 27.52^{\circ}\text{C}$$

Element senzoru GE teoreticky změří teplotu 27,52°C. Tento výsledek nám vyšel za nejlepších podmínek, kdy maximální plocha objektu překrývá optickou plochu pozadí. Rozdíl změřené teploty od teploty pozadí je 1,5° C, což je zanedbatelná změna při chybě měření $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ garantované výrobcem.

Aby rozdíl změřené teploty a teploty pozadí v předchozím případě byl roven 3° C, je třeba, aby byl objekt vzdálen 2,54 m (viz rovnice (2) a (3)).

1.4 GE jako zdroj přerušení

Jeden z výstupů GE se nazývá INT. Tento výstupní pin generuje přerušení při překročení nastavených hodnot a je připojen pull-up rezistorem na napájení. Je třeba jej připojit na vstup externího přerušení MCU. Nastavuje se horní a spodní mez teploty. Pokud teplota jednoho z pixelů tuto mez překročí, je INT aktivní (v log 0). Aktivním zůstává do té doby, dokud nedojde k aktualizaci teplotních registrů, nebo k vynulování příznaku přerušení v příznakovém registru. GE také obsahuje 8 registrů s uloženou pozicí pixelů, jejichž teplota překročila zvolené meze.

1.5 Doporučené vnější zapojení GE

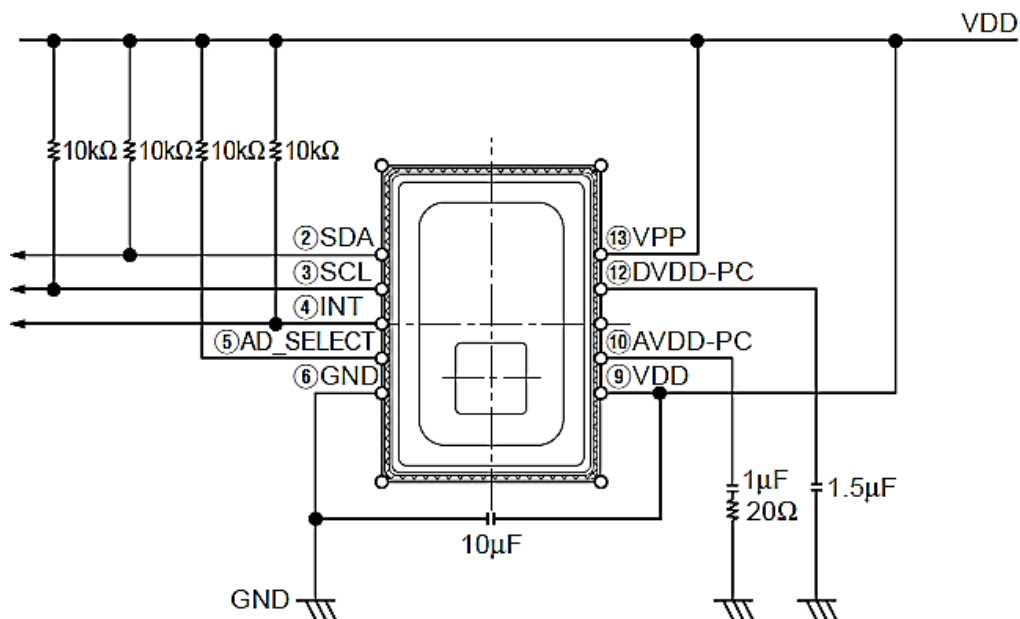
Senzor GE ke své činnosti potřebuje jen několik externích součástí (viz Obrázek 3).

K mikrokontroléru budou zapojeny vývody SCL a SDA, které jsou potřebné ke komunikaci I2C a vodič generující příznak přerušení INT. Délka komunikační linky by měla být co nejkratší, případně stíněná. Parazitní kapacita spoje nesmí přesahovat 400 pF. Pull-up rezistory se odvozují podle rovnice (4). Výrobce udává standardní hodnotu $R_p = 10 \text{ K}\Omega$, ta odpovídá kapacitě spoje $C_b = 100 \text{ pF}$ a nástupné hraně signálu $t_r = 100 \text{ ns}$.

$$R_p = \frac{t_r}{C_b} \quad (4)$$

V neaktivním stavu udržuje senzor linku INT ve vysoké úrovni. Při signalizaci přerušení GE linku stáhne na nízkou úroveň.

Přivedením na vstup AD_SELECT log 0 nebo log 1 si určíme LSB Slave adresy (0b1101 000 nebo 0b1101 001).



Obrázek 3: Schéma zapojení senzoru GE doporučeného výrobcem [1].

2 KOMUNIKACE GE S OKOLNÍMI ZAŘÍZENÍMI

GE podporuje komunikaci pouze po sběrnici I2C, dále ze zadání vyplývá, že senzor GE má být řízen mikrokontrolérem. Tato kapitola obsahuje obecný teoretický rozbor komunikace mezi těmito zařízeními a PC.

2.1 Sběrnice I2C

Sběrnice I2C (Inter-Integrated Circuit) byla vyvinuta firmou Philips Semiconductor. Jejímž úkolem je zprostředkování komunikaci mezi dílčími bloky v rámci jednoho zařízení.

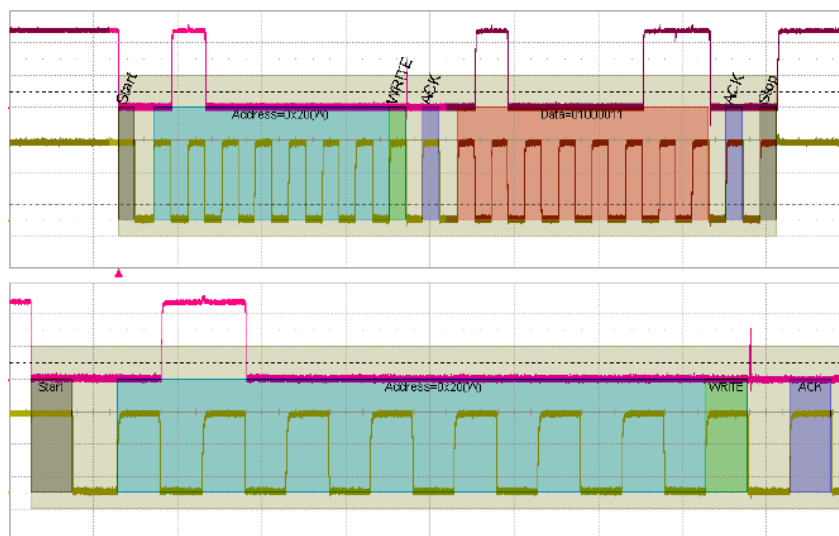
2.1.1 Základní popis protokolu I2C [3]

Sběrnice I2C je tvořena dvojicí signálů, představující datový kanál SDA a hodinový signál SCL. Komunikace reprezentuje hierarchické spojení nadřazeného zařízení (Master) a podřízených obvodů (Slave). Úkolem nadřazených obvodů je řízení celé komunikace, vznášení požadavků a generování hodinového signálu. Každý podřízený obvod má implementovanou svou jedinečnou adresu, pomocí níž je adresován [3].

Komunikace po sběrnici je řízena komunikačním protokolem, který popisuje zahájení komunikace, strukturu adresního a datového paketu, dále popisuje způsoby potvrzování přijatých paketů a ukončení komunikace. Klidová úroveň na obou linkách sběrnice I2C je v log. 1 a datovou linku smí ovládat vždy jen jedno zařízení. Pro úroveň signálu na datové lince SDA platí, že musí být neměnná v okamžiku vysoké úrovně hodinového signálu SCL. To neplatí pouze u startovací a ukončovací podmínky [3].

Adresní paket se skládá z 7bitové adresy podřízeného obvodu, dále z bitu určující následné čtení nebo zápis z obvodu a do něj. Paket je ukončen potvrzovacím bitem ACK od podřízeného obvodu. Je-li hodnota tohoto bitu v log. 0, je potvrzení platné, zůstane-li v log. 1, potvrzení neproběhlo a komunikace nebyla navázána. Adresa je zapisována v pořadí od MSB k LSB [3].

Datový paket obsahuje 8bitové datové slovo, rovněž v pořadí od MSB k LSB a je ukončen potvrzovacím bitem ACK s aktivní úrovní v log. 0. Na obrázku 4 je zobrazen průběh zápisu bitové hodnoty 0b01000011 do zařízení Slave s adresou 0b0100000 [3].



Obrázek 4: Průběh zápisu dat, do zařízení Slave [3].

2.1.2 Výměna dat na I2C

Většina zařízení označovaných jako Slave obsahuje vnitřní registry, stejně tak jako GE. Řídicí mikrokontrolér je pojmenován jako Master.

Abychom mohli do jednotlivých registrů ve Slave zapisovat, nebo z nich číst, musíme nejprve tyto registry adresovat.

Každá operace, čtení nebo zápis, je rozdělena na dva cykly. V prvním cyklu Master zašle adresu zařízení Slave s příznakem pro zápis, a poté adresu cílového registru, která je ve Slave dočasně uložena. První cyklus je pro obě operace totožný. V druhém cyklu musí Master opět začít START podmínkou a zaslat adresu zařízení Slave. Až zde rozhodneme, kterou operaci zvolíme a to příznakem na pozici LSB v adrese zařízení. Další postup je patrný z kapitoly 2.1.1.

Problematika je graficky znázorněna na obrázcích 5 a 6. Buňky vybarvené žlutou barvou jsou vyvolány Masterem, ty zelené jsou vyvolány Slavem. NACK je zkratka pro No ACK.

Cyklus 1:	START	Adresa senzoru	WRITE	ACK	Adresa registru	ACK	
Cyklus 2:	START	Adresa senzoru	READ	ACK	Data	NACK	STOP

Obrázek 5: Grafické znázornění čtení dat z registru zařízení Slave po sběrnici I2C.

Cyklus 1:	START	Adresa senzoru	WRITE	ACK	Adresa registru	ACK	
Cyklus 2:	START	Adresa senzoru	WRITE	ACK	Data	ACK	STOP

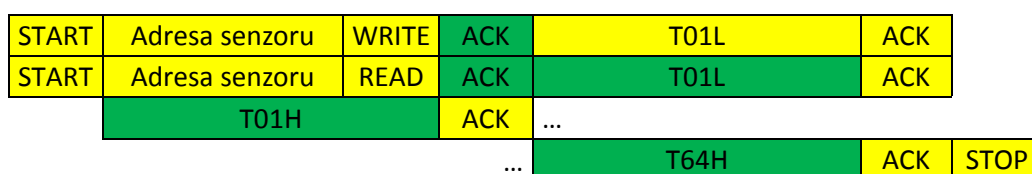
Obrázek 6: Grafické znázornění zápisu dat do registru zařízení Slave po sběrnici I2C.

2.1.3 Kontinuální režim I2C

Kontinuální režim znamená, že pokud inicializujeme např. čtení ze Slave registru na

konkrétní adresy (cyklus 1 v předchozí kapitole) a přijatá data jsou potvrzována ACK, ze strany Masteru. Slave poté automaticky vyšle data z registru na inkrementované adresy. Slave takto pokračuje až do té doby, dokud není přerušeno Masterem. Tento režim funguje i při zápisu. Je zřejmé, že tento postup zabere méně času.

Pro názornost je přiložen obrázek 7. V obrázku 7 jsou již použité skutečné registry senzoru GE, který tento režim zcela podporuje. Adresou 0x80 je označen registr s názvem T01L. V tomto registru je uložena spodní 8bitová část ("L") teploty ("T") na 1. pixel ("01"). Adresou 0x81 je označen registr T01H a tak to pokračuje, až na adresu 0xFF s registrem T64H. V rozmezí těchto registrů (adres) je uloženo celé snímané teplotní pole.



Obrázek 7: Grafické znázornění kontinuálního režimu sběrnice I2C při čtení.

2.1.4 Programové vybavení pro Master

K řízení komunikace po sběrnici I2C byla použita knihovna od pana Petera Fleuryho, psaná v jazyce C. Tato knihovna je volně dostupná na internetových stránkách viz [4]. Jediným z důvodů proč byla zvolena tato knihovna, je že je psaná pro mikrořadiče rodiny AVR a testována na kompilátoru GCC. Touhle cestou bude směřovat i zbylá softwarová část práce. V tabulce 2 jsou popsány funkce této knihovny.

Tabulka 2: Seznam funkcí knihovny pro komunikaci I2C [4]

Hlavička funkce	Popis
void i2c_init(void)	inicializace sběrnice, nastavení frek. SCL
unsigned char i2c_start(unsigned char address)	podmínka START
void i2c_start_wait(unsigned char address)	pod. START a čeká na odezvu SLAVE
void i2c_stop(void)	podmínka STOP
unsigned char i2c_write(unsigned char data)	zápis dat nebo adresy na sběrnici
unsigned char i2c_readAck(void)	přečti data a potvrď ACK
unsigned char i2c_readNak(void)	přečti data a nepotvrď ACK

V knihovně je nastaven kmitočet SCL na 100 kHz pro f_{clk} 4MHz, tyto hodnoty je potřeba modifikovat a tudíž i upravit funkci `i2c_init`.

Dále do knihovny [4] byly vloženy funkce `i2c_read_reg`, `i2c_nastav_reg`, `read_reg_temp` a `read_reg_temp_int`. Rozdíl mezi posledními dvěma funkcemi je ten, že ve funkci `read_reg_temp` se pracuje s maticí definovanou jako `unsigned char` a absolutní přijaté hodnoty jsou přímo přepočítávány na barevnou reprezentaci (více v kapitole 5). Tyto funkce jsou znázorněny v příloze 3. První dvě zmíněné funkce slouží k zápisu nebo čtení dat z jednoho registru, odvozené z kapitoly 2.1.2. Funkce `read_reg_temp_int`

je přímo určená ke vyčítání 128 teplotních registrů. Tato funkce vyplývá z kapitoly 2.1.3.

2.2 Časová analýza komunikace po I2C

V předchozích kapitolách je popsáno, jak probíhá komunikace mezi mikrokontrolérem a naším senzorem. Tato kapitole bude zaměřena na časový úsek, ve kterém dokážeme odeslat celou teplotní mapu uloženou v GE.

To spočívá v odeslání teplot ze všech 128 registrů. Teoreticky maximální možná frekvence, kterou GE podporuje, je 400 kHz. Z frekvence SCL přímo vyplývá rychlost toku dat v kbit/s. Výpočet celkového času přenosu obrazu je naznačeno v rovnici (5).

$$t_{64} = \frac{1}{f_{SCL}} (9(R + 3) + 3) \quad (5)$$

f_{SCL} je frekvence komunikace I2C na pinu SCL,

t_{64} je celkový čas komunikace při aktualizaci všech 64 teplot.

Proměnná R udává počet odeslaných datových bytů. V našem případě se jedná o 128 B, poté musíme přičíst 3 B, ve kterých jsme odeslali dvakrát adresu Slave a jednou adresu prvního čteného registru uvnitř Slave. Celkový počet slov vynásobíme konstantou 9. Je to z toho důvodu, že zasláný 1 B potvrzujeme 1bitovým ACK. K této hodnotě stačí připočíst počet podmínek START a STOP, které jsou z pravidla 3. Známe počet odeslaných bitů a ten vynásobíme periodou kmitočtu SCL.

Výsledkem je teoretická doba komunikace po sběrnici I2C předcházející novému snímku. Vypočtený časový úsek je platný pouze v tom případě, že nevyčítáme ostatní registry, nepotřebné k zobrazení aktuálního snímku. V tabulce 2 jsou vyjádřeny časy úseků komunikace. K zjištění přesných hodnot času je zapotřebí použít např. osciloskop.

Tabulka 3: Tabulka vypočítaných hodnot časových úseků při přenosu dat.

f_{SCL}	T_{SCL}	t_{9bit}	t_{64}
[kHz]	[μs]	[μs]	[ms]
100	10	90	11,82
400	2,5	22,5	2,955

f_{SCL} je frekvence komunikace I2C na pinu SCL,

T_{SCL} je perioda komunikace I2C na pinu SCL,

t_{9bit} je hodnota času. Za kterou se po sběrnici přenesou 9bit

t_{64} je celkový čas komunikace při aktualizaci všech 64 teplot.

2.3 Komunikace s PC přes sběrnici USB

Včetně zobrazování dat na LCD display budeme získaná data zasílat do PC k dalšímu zpracování. V současné době se k připojení periférií k počítači nejvíce používá sériová sběrnice USB. V této kapitole budou popsány základní předpoklady USB.

2.3.1 Popis topologie sběrnice USB a normy komunikace

Sběrnice USB je zapojená do tzv. stromové topologie, kde kořenem je konečný řídicí uzel zvaný Master (USB Host kontrolér). Ten inicializuje a řídí celou komunikaci, v našem případě je tento koncový uzel PC. Na konci větví jsou zařízení Slave, ta jsou spravována koncovým uzlem. Topologie se větví přes rozbočovače (HUB). Je tomu tak z důvodu, že ke koncovému uzlu můžeme připojit pouze jedno zařízení. Rozvětvením topologie dokáže Master komunikovat až se 127 zařízeními po jedné sběrnici. Příklad topologie je naznačen na [6].

Zařízení, která jsou připojena na sběrnici USB, mohou přenášet data několika rychlostmi. Norma označovaná jako USB 1.0, stanovuje dvě rychlosti. Základní rychlost je označena jako Full Speed. Některá zařízení, určená k řízení aplikace uživatelem, zvaná HID (klávesnice, myš) nepotřebují vysoké rychlosti ke své činnosti. Taková zařízení pracují ve třídě Low Speed. Norma USB 2.0 stanovuje i vyšší rychlost – High speed. Obě normy jsou spolu kompatibilní. Souhrn přenosových rychlostí je uveden v tabulce 4 [6].

Tabulka 4: Souhrn rychlostí přenosu dat jednotlivých tříd USB.

Třída	Rychlost přenosu dat	
	low-speed	high-speed
low-speed	1,5 Mbit/s	187,5 kB/s
full-speed	12 Mbit/s	1,5 MB/s
high-speed	480 Mbit/s	60 MB/s

Dvou komunikační uzly jsou propojeny čtyřmi vodiči. Dva vodiče slouží jako přívod napájení pro připojené zařízení. Další dva vodiče, jsou určeny pro sériový poloduplexní přenos dat s využitím diferenčního kódování [6].

2.3.2 Časová analýza přenosu dat protokolu USB.

Komunikace se zařízením vždy inicializuje Master. Tím vzniká odezva, kdy Slave čeká, až bude Masterem osloven. S tímto faktem musí návrhář Slave zařízení počítat. Přenos dat je rozdělen do paketu. Schéma takové komunikace je znázorněno v tabulce 5. Jako rychlostní třída přenosu dat byla vybrána low-speed. Výsledné hodnoty doby komunikace je pouze orientační. Pro získání reálné doby komunikace je potřeba použít např. osciloskop. Tyto údaje jsou zásadní pro realizaci zařízení se softwarově implementovaným rozhraním USB.

Tabulka 5: Schéma komunikace podle protokolů USB.

Název paketu	Počet bitů	Stručný popis	Doba přenosu [us]
Preamble	8	synchronizace ze slave	5,33
Token paket	27	Identifikace zařízení	18,00
Preamble	8	synchronizace ze slave	5,33
Datový paket	91	ve třídě HID 8 užitečných Bajtů	60,67
Preamble	8	synchronizace ze slave	5,33
Handshake paket	11	Status koncového uzlu (ACK, NACK,...)	7,33
K odeslání teplotního pole je potřeba odeslat 16 datových paketů			
15x data p. + HS p.	1770	15x datový p. a handshake p. a preambles	1180
Konec komunikace		Součet:	1281,99

2.4 Realizace komunikace po USB

V této kapitole jsou probrány možnosti realizace USB. Výhody a nevýhody probraných řešení, jsou shrnuty v tabulkách 6 – 8.

2.4.1 Obvody FTDI

Nejčastější metodou je použití řadičů firmy Future Technology Devices International (FTDI), tento chip převádí protokol USB na běžně mikrokontroléry používané sériové či paralelní sběrnice, jako je na příklad I2C a UART. Tyto obvody již podporují i normu USB 2.0 pracující ve třídě high-speed. Výrobce dodává obvody již s nainstalovaným firmwarem. Obvody FTDI jsou řízeny příkazy zaslané z kontroléru.

Nejčastěji používaným obvodem z této rodiny je obvod FT232RL, ten komunikuje s MCU přes asynchronní linku.

Tabulka 6: Seznam výhod a nevýhod řadiče FTDI.[8]

Výhody	Nevýhody
vysoká spolehlivost	obtížná upravitelnost
virtuální COM port	nutnost používat ovladače výrobce
podpora USB 2.0	vysoká cena (až 150 Kč)

2.4.2 AVR s Hardwarovou implementací USB

Firma Atmel nabízí 8bitové mikrokontroléry AVR a 8051 s hardwarově implementovaným řadičem USB přímo na čipu. Řadič obsahuje vlastní periférie jako je vyrovnávací paměť, zdroj hodinového signálu a také měnič napětí na 5 V (i při napojení kontroléru 3,3 V). Řadič podporuje normu USB 1.0, jak low-speed, tak full-speed. Firma Atmel není jediná, která nabízí toto řešení u svých mikrokontrolérů. Najdeme ji i u jiných světových výrobců.

Tabulka 7: Seznam výhod a nevýhod Kontrolérů Atmel s řadiči USB [8].

Výhody	Nevýhody
spolehlivost	náročný návrh
vše v jediném pouzdře	Pouze v pouzdře SMD
libovolná funkčnost	Horší dostupnost
možnost programování čipu přes USB	

2.4.3 Softwarová Implementace protokolu USB

USB řadič je touto metodou realizován pouze softwarovou cestou. Program je nahrán do kontroléru, který spravuje celou komunikaci. Tato realizace často pracuje ve třídě HID. V této třídě nemůžeme počítat s přenosem velkých kapacit dat. Tato možnost je spíše vhodná v aplikacích, ve kterých chceme mikrokontrolér řídit pomocí PC.

Tabulka 8: Seznam výhod a nevýhod Softwarové implementace USB řadiče.[8]

Výhody	Nevýhody
nízká cena (40 Kč)	velmi náročný návrh
bezproblémová dostupnost	nízká přenosová rychlost
libovolná funkčnost	

2.4.4 Získání dat a jejich zpracování v PC

Pro řešení tohoto problému existuje několik možností. Jednou z možností je realizace komunikace, z pohledu masteru, pomocí vývojového prostředí Matlab. Matlab obsahuje balíček funkcí s názvem “Serial Port Devices“ a pomocí těchto funkcí komunikaci řídí. Důvodem volby matlabu je jeho předurčenost k práci s maticemi jako je například výstup senzoru Grid-EYE. Dále možnost vytvoření grafického uživatelského rozhraní zvané GUI (Graphical User Interface).

3 VIZUALIZACE DAT

Ze zadání plyne, že výsledná aplikace musí zobrazovat výstupní data na barevný display řízený mikrokontrolérem. Jako nejjednodušší varianta se jeví použití maticového RG led displeje.

Aby byla zvýšená úroveň vizualizace, bude použit několikapalcový grafický RGB LCD display. Výsledkem bude získání širšího spektra barev pro rozlišení teplot na displeji, a také se otevírají nové možnosti uživatelského prostředí.

LCD musí dosahovat takových rozměrů, aby byla každá buňka matice dobře rozlišitelná. V běžném módu bude zobrazená čtvercová matice a dále termická křivka, tudíž je potřeba širokoúhlého obrazu. Nedílnou součástí každého displeje je také řadič, který ovládá přepínání jednotlivých pixelů a určuje jejich barvu. Právě mikrokontrolér komunikuje s tímto řadičem a určuje, které obrazce či bitmapy se budou zobrazovat. K řízení řadiče bude používat knihovna funkcí, tyto funkce jsou na návrh velice náročné, proto je výhodnější zvolit takový LCD s řadičem, ke kterému jsou knihovny volně dostupné. Posledním, ale často závažným, kritériem je dostupnost produktu a jeho cena.

3.1 Maticový RG led display 8x8

Jedná se v podstatě o 64 LED červené barvy a 64 LED zelené barvy, které jsou uspořádány do matice o osmi sloupcích a osmi řádcích. Každá LED je jeden subpixel. Pixel může nabývat čtyř stavů (nesvítí, zelená, oranžová, červená).

Každý pixel je spínán zvlášť rychlostí přesahující kmitočet 50 Hz. Nedokonalostí lidského oka tak vzniká dojem spojitého obrazu. Při zobrazení jednoho pixelu smí být aktivní pouze jeden řádek (případně sloupec), jinak dochází k disfunkci. V Příloze 2 je ukázka zobrazení z matic definovaných vývojářem.

Připojení displeje přímo na porty kontrolérů se nedoporučuje, kvůli velkému odběru proudu jednotlivých pinů. Proto jsou displeje vybaveny spínacími prvky.

3.1.1 Zobrazení výstupu senzoru GE

Jelikož jsou k dispozici pouze čtyři barevné úrovně, musí být zvoleno, které rozpětí teplot je monitorováno a podle něj určit tři komparační úrovně. Mikrokontrolér každé obdržené teplotě přidělí úroveň (barvu) a zakóduje ji pro jednotlivé led. Ty jsou poté zobrazeny na display.

3.2 Barevný grafický LCD displej ITDB02

Jedná se o velice populární LCD od firmy Itead studio. Z této rodiny displejů byl vybrán LCD s úhlopříčkou 2,4 palců. LCD disponuje rozlišením 320x240 pixelů s podporou až 65 tisíc barev. Řadič displeje podporuje 8 nebo 16bitovou komunikaci.

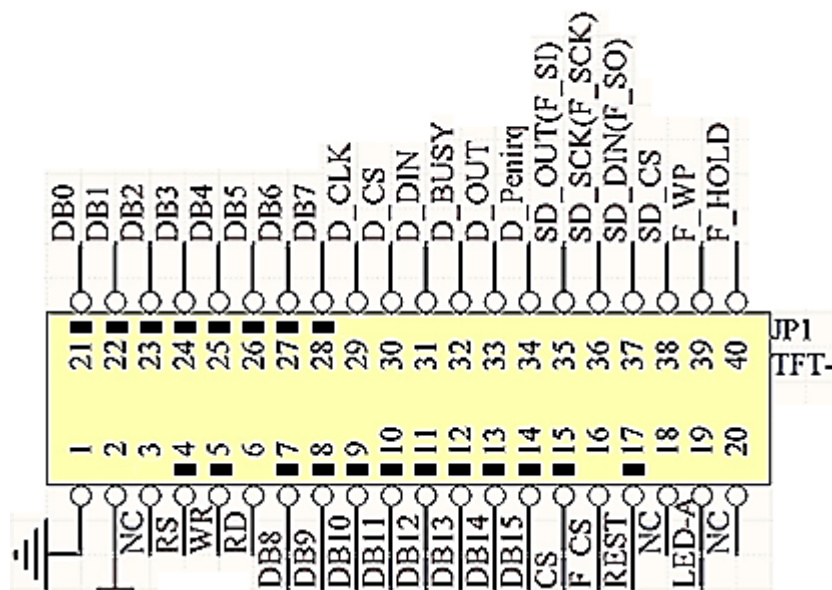
Zařízení označené ITDB02-2.4E, kromě LCD, dále obsahuje: hardwarovou podporu dotykové vrstvy a čtení a zápis paměťových karet SD. Tyto periférie připravku otevírají další možnosti výsledné aplikace [10].

Zvolené ITDB02 je velice zajímavé svoji nízkou cenou ve srovnání s možnostmi, které nabízí. Jedinou nevýhodou je nízká dostupnost produktu na trhu. To ovšem není tak zásadní problém. I když k ceně displeje bude připočtená cena za poštovní služby, je stále jeho koupě výhodnější, ve srovnání s cenou v tuzemských obchodech jiných LCD. Zvolené LCD je možné zakoupit na internetových stránkách firmy Itead studio (viz [10]).

3.2.1 Popis vstupně výstupních pinů ITDB02

Veškeré vstupně výstupní piny periférií jsou obsaženy v patici TFT-40. Jejich uspořádání je znázorněno na Obrázek 8. Patice obsahuje porty řadiče dotykové vrstvy („D“), obsluhy slotu SD karet („SD“), obsluhy externí flash paměti („F“) a obsluhy LCD (bez předpony) [10].

V režimu 16bitové komunikace jsou aktivní piny DB0 až DB15, které slouží k datové komunikaci. K řízení komunikace displeje dále potřebujeme piny RS (Register Select), WR (Write), CS (Chip Select), RST (reset). Pin RD (Read Data) je připojen k napájení. K řízení LCD potřebujeme 20 vstupně výstupních pinů kontroléru [11].



Obrázek 8: Popis pinů patice TFT-40. Označené vývody je třeba připojit ke kontroléru [10].

3.2.2 Knihovny funkcí pro ITDB02

Nespornou výhodou je dostupnost knihoven kompatibilních s řadičem Samsung S6D1121, který spravuje chod displeje.

Nabízí se použití knihovny od pánů Pavla Matyáše a Petra Hracha [11]. Jedná se o modifikaci knihovny, jejímž autorem je pan Henning Karlsen [12]. Knihovna [11] je

psaná v jazyku C a přizpůsobená pro práci s mikrokontroléry Atmel AVR. Velikost knihovny je 16 KB. Hlavičky některých funkcí a jejich popis je v příloze 1.

Knihovna je psána pro řadič ILI9325. Zvolený displej používá řadič S6D1121, u kterého probíhá inicializace odlišně. Takže je potřeba provést změny ve funkci `LCD_init()`. Na internetových stránkách prodejce [10] je možné volně stáhnout knihovnu UTFT a podle ní provést tyto změny. Tato knihovna je psána v jazyce C++ a obsahuje množství různých podmínek pro každý model řadiče a stává se tím tak nadbytečně obsáhlá pro cílovou aplikaci.

4 VOLBA MIKROKONTROLÉRU A NÁVRCH BLOKOVÉHO ZAPOJENÍ

Cílem této kapitoly je zvolit vhodný mikrokontrolér, který bude splňovat všechny požadavky odkryté v předchozích kapitolách. Dále se tato kapitola zabývá zbytným návrhem implementace zvoleného mikrokontroléru do cílové aplikace.

4.1 Souhrn požadovaných parametrů

Souhrn požadavků je znázorněn v tabulce 9. Každý požadavek je odůvodněn ve sloupci poznámek.

Cílem je vybrat takový mikrokontroler, který bude k již zmíněným požadavkům také obsahovat takový počet vstupně výstupních pinů, aby bylo možné kromě LCD také řídit driver dotykové vrstvy.

Tabulka 9: Souhrn nároků kladených na mikrokontrolér

Parametry	Poznámky
3,3 V	Napájení ITDB02
>16KB flash	Velikost knihovny [11]
I2C	Komunikace s GE
16 bit interní časovač	Synchronizace s FPS (GridEYE)
USB nebo USART	USB implementace nebo rozhraní ke komunikaci s FTDI chipem
20 i/o	Řízení LCD
5 i/o	Řízení dotykové vrstvy

Mezi požadavky není žádný zvláště specifický. Tyto požadavky splňuje většina mikrokontrolérů současnosti. Zásadním se tedy stává volba způsobu komunikace s PC.

4.2 Možnosti struktury zapojení

Nabízí se několik variant zapojení, tyto varianty jsou zhodnoceny v tabulce 10. Zvolená varianta přímo souvisí i s volbou mikrokontroléru. Mezi možnostmi bylo, kromě zapojení MCU s čipem FTDI a MCU s HW implementací USB, také použití dvou mikrokontrolérů.

Jeden z mikrokontrolérů zajišťuje komunikaci mezi senzorem GE a PC. Druhý kontrolér řídí chod LCD i s jeho ostatními periferiemi. O této možnosti se dá uvažovat pouze za úmyslem užití všech periférií ITDB02.

Tabulka 10: Relativní srovnání variant zapojení v základních kategoriích.

	MCU+FTDI	MCU_HU	MCU+MCU_HU	MCU+MCU_SU
Obtížnost návrhu SW	1.	2.	3.	4.
Cena	3.	2.	4.	1.
Možnosti	4.	3.	2.	1.
Dostupnost	1.	2.	2.	1.

MCU+FTDI	Použití kontroléru a obvodu FTDI (FT232RL)
MCU_HU	Použití kontroléru s HW implementací USB
MCU+MCU_HU	Použití kontroléru a kontroléru s HW implementací USB
MCU+MCU_SU	Použití kontroléru a kontroléru s SW implementací USB

Rozhodnutí, která struktura bude pro cílovou aplikaci nejvhodnější, je velice individuální a záleží na řešiteli.

Jako nejvhodnější varianta byla zvolena MCU + FTDI. Především pro její jednoduchost, dostupnost a spolehlivost. Nakonec byl zvolen modul s čipem PL2303HX, který má srovnatelné parametry s čipem firmy FTDI. Byl zvolen hlavně díky nízké ceně a dostupnosti.



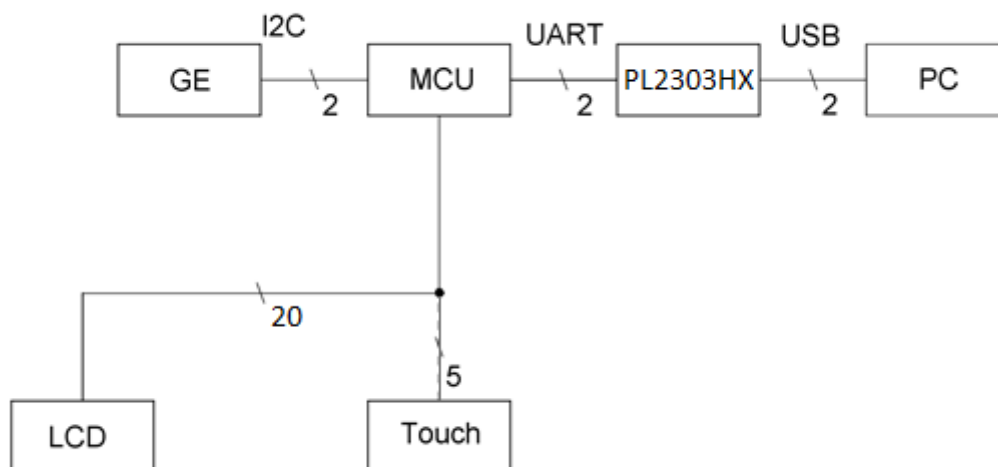
Obrázek 9: Fotka modulu s PL2303HX

4.3 Volba mikrokontroléru a návrh blokového schéma zapojení

Volba mikrokontroléru je velice individuální. Jak bylo v předešlém textu naznačeno, zvolený kontrolér bude značky Atmel.

Požadavky na periferie MCU jsou pro kontroléry rodiny AVR standardem. Pro splnění zbylých parametrů byl zvolen mikrokontroler AVR Atmega32A.

Tento typ byl vybrán především z důvodu, že třída A dovoluje použití řídicí frekvence 16 MHz při napájecím napětí 3,3 V. Zvolený kontrolér má 4 vstupně výstupní porty, které pro použití periferie dotykové vrstvy stačí. Blokové schéma zapojení je naznačeno na obrázku 9. Rozvrh zapojení jednotlivých pinů kontroléru je znázorněn v tabulce 11. Programová paměť MCU je 32 KB. Kapacita paměti je dvakrát větší než hranice požadavku > 16 KB.



Obrázek 10: Blokové schéma zapojení Demo aplikace se senzorem GE

Touch driver dotykového vrstvy displeje
 PL2303HX konkrétně modul s obvodem PL2303HX

Tabulka 11: Přidělení pinů MCU jednotlivým blokům zapojení viz Obrázek 9.

Bloky a sběrnice podle Obr 9	Název pinu	Alternativní název
I2C	PC1, PC0	SDA, SCL
UART	PD1, PD0	TXD, RXD
LCD	PORTA, PORTB	-
Touch	PC3-PC7	-
Nepoužité	PC2, PD2, PD3	-

Pozn.: Alternativní názvy vstupně výstupních vývodů periférií na konkrétních pinech jsou přejaty z [13]. Vysvětlivky viz obrázek 9.

Celé zapojení je navrženo na napětí 3,3 V. Při použití zdroje napájení portu USB je zapotřebí napětí stabilizovat z 5 V na tuto hodnotu.

4.4 Blokový návrh napájecí části

Návrh jakéhokoliv elektronického zařízení se neobejde bez napájecí části. Cíl této podkapitoly je navrhnout subsystém, který bude po připojení USB dobíjet akumulátor a po odpojení se adaptivně jako zdroj energie zapojí sám akumulátor. To celé by mělo proběhnout tak, aby uživatel měl dojem, že k žádnému přepínání nedochází.

4.4.1 Volba akumulátoru a jeho příslušenství

Jako první je potřeba zvolit akumulátor. Byl vybrán typ Li-ion z důvodů velkého množství integrovaných obvodů specializovaných na správu. Dále, kvůli potřebné kapacitě 0,6 A/h, ta vyplývá z teoretické celkové proudové spotřeby aplikace (55 mA) a požadavku na výdrž 8 hodin, jsme zvolili typ SANYO UF463048F (viz [15]). Velkou předností toho typu jsou malé rozměry a nízká cena. Při výběru dalšího příslušenství je třeba dbát na kompatibilitu s nominálním napětím akumulátoru 3,7 V.

Akumulátory typu Li-Ion jsou náchylné na přebíjení, přílišnému vybití, přetížení a zkratu. K zabránění těchto stavů se používají ochranné obvody. Jedním z nich je obvod NT1854 od firmy NEOTECH (viz [16]). Tento integrovaný obvod byl zvolen kvůli dobré dostupnosti.

Další obvod pro správu akumulátoru Li-Ion je tzv. nabíječ. Zvolený akumulátor je nabíjen technikou CCCV (Constant Current – Constant Voltage) a podle tohoto kritéria zvolíme i nabíječ. Požadavek splňuje obvod značky Linear technology LTC4054 s nastavitelným nabíjecím proudem. Nabíječ je napájen napětím z USB s maximálním proudovým odběrem 500 mA. Přehled proudového odběru aplikace je v tabulce 12, hodnoty jsou převzaty z údajů uvedených výrobcem. Tudiž bychom akumulátor mohli nabíjet proudem až 445 mA. To by podle vzorce $I_{BAT}=1000/R_{PROG}$ [19] (I_{BAT} - Nabíjecí proud, R_{PROG} - Nastavující odpor) odpovídalo odporu 2,2 kΩ. V rámci předimenzování zvolíme odpor 2,7 kΩ (370 mA).

Tabulka 12: Přehled udávaných odběrů proudu jednotlivých obvodů.

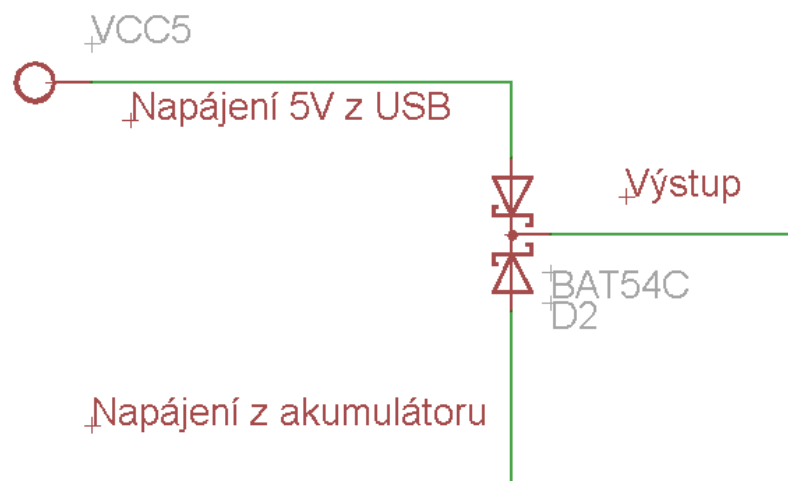
Název obvodu	Maximální proudový odběr	Popis obvodu
ITDB02	40 mA	LCD, Touch
ATmega32A	8 mA	MCU
ADS1000	150 μA	AD převodník
Grid-EyE	4,4 mA	teplotní senzor
LTC4054	2 mA	Nabíječ
Součet	55 mA	

Uživatelsky důležitou funkcí je odhad výdrže baterie. Ideální by bylo najít takový integrovaný obvod komunikující přes sběrnici I2C. Tak by byla zaručena komunikace s kontrolérem, který by přijatá data zpracovával a výsledky by číselně nebo graficky zobrazoval na LCD displeji. Pro tento účel byl vybrán samostatný A/D převodník ADS1000 komunikující právě přes I2C. Kontrolér bude tedy vyhodnocovat stav baterie podle hodnoty aktuálního napětí. Průběh napětí akumulátoru v čase je závislostí na

okolní teplotě a na hodnotě odebíraného proudu, proto tuto závislost bude potřeba určit a uložit do paměti kontroléru. Řešení komplikuje fakt, že ADS1000 komunikuje s kontrolérem pracujícím na 3,3 V, tudíž bude použito stejné napájecí napětí i pro tento obvod. Referenční napětí je odvozeno z napájecího napětí. Na druhou stranu snímáme napětí o maximální hodnotě 4,2 V. Tento nepoměr vyrovnáme napěťovým děličem na vstupu A/D převodníku.

4.4.2 Selektivita napájecích zdrojů a stabilizace napětí

K zajištění selektivity napájecích zdrojů je zapotřebí realizace přepínače mezi stavem napájení aplikace z externího zdroje (USB) nebo stavem napájení aplikace z akumulátoru. Nejjednoduším, nejspolehlivějším a nejlevnějším řešením je oddělení dvěma Schottkyho diodami se společnou katodou, tak jako na obrázku 11. Jedinou nevýhodou je pokles napětí přibližně o 0,2 V na výstupu v obou stavech. Tímto zapojením je docíleno selektivního napájecího zdroje podle velikosti napětí, a jelikož napájení z USB má garantováno větší napětí než maximální přípustné napětí akumulátoru, bude vždy primární. Dále toto zapojení zabrání parazitnímu nabíjení akumulátoru z větve napájení z USB.

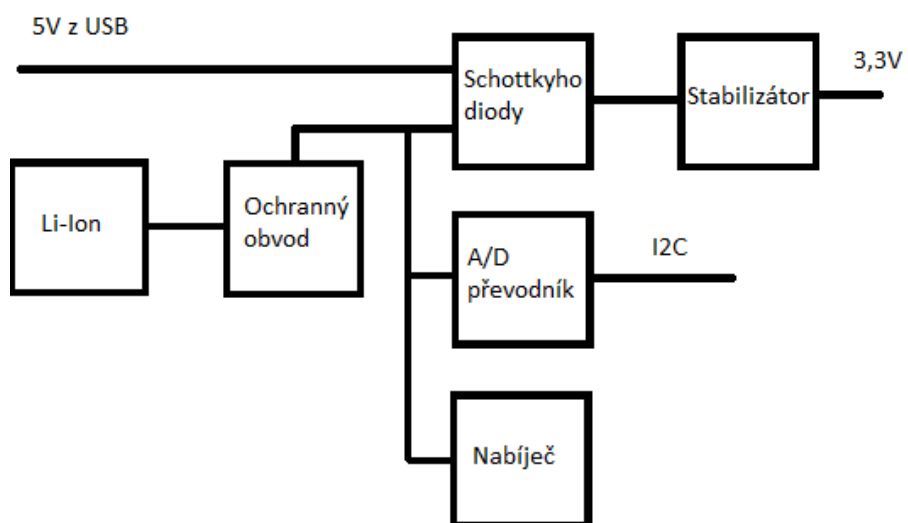


Obrázek 11: Zapojení napájení z USB a akumulátoru přes dvě Schottkyho diody.

Posledním krokem je volba vhodného stabilizátoru na 3,3 V s úbytkem napětí 0,1 V (Dropout voltage). Tato hodnota vyplývá z vybíjecí charakteristiky zvoleného akumulátoru, která se dá lineárně aproximovat přibližně do hodnoty napětí 3,6 V [15] (poté exponenciálně klesá). Dále se musí brát v úvahu prahové napětí Schottkyho diody 0,2 V. Z toho vyplývá vůle 0,1 V, aby byla využita celá kapacita akumulátoru. Byl zvolen stabilizátor LM2936M – 3.3. Tento stabilizátor byl vybrán kvůli dostupnosti. Stabilizátor překročil maximální úbytek napětí 2krát a to s hodnotou 0,2 V (Typ).

4.4.3 Výsledné blokové schéma napájecí části

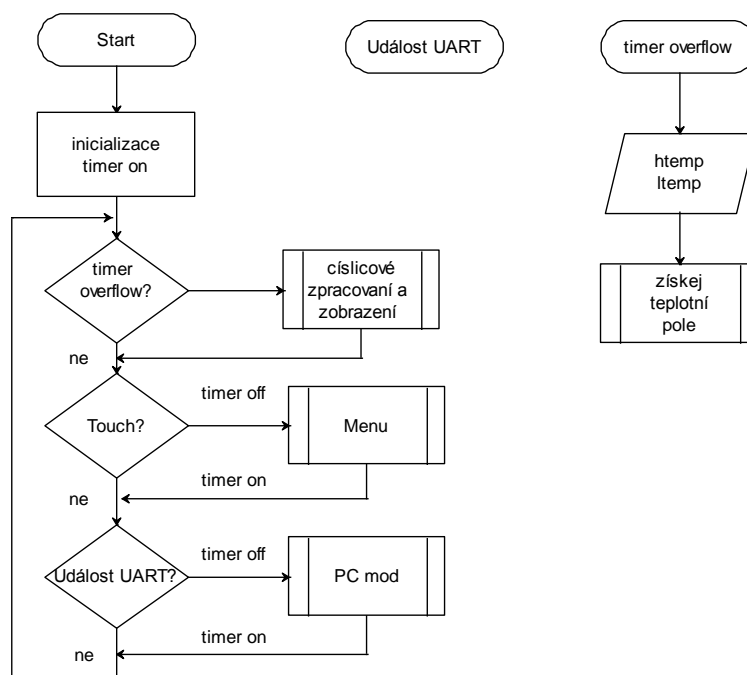
Výsledné zapojení je naznačeno na obrázku 12. Nejsou zde vyznačena napájení jednotlivých bloků.



Obrázek 12: Blokové schéma napájecí části výsledné aplikace.

5 SOFTWARE APLIKACE

V dřívějších kapitolách bylo pojednáno o jednotlivých prvcích aplikace, jako byl sensor Grid-EYE, Modul ITDB02 s LCD a driver dotykové vrstvy. V této kapitole bude popsán vývoj softwarového vybavení kontroléru, a také bude představeno grafické prostředí GUI.



Obrázek 13: Vývojový digram popisující hlavní smyčku programu

Na obrázku 13 je naznačen hlavní algoritmus výsledného programu. Jednotlivé bloky budou popsány ve zbytku kapitoly. Blok inicializace bude probrán v nadcházejících podkapitolách. Je ovšem důležitá skutečnost, že je zde zapnut časovač. Poté program vstoupí do nekonečné smyčky, která je řízena podněty z venčí, jako jsou přerušení způsobené přetečením časovače, událost na sériové komunikační lince a přerušení vyvolané driverem dotykové vrstvy. Tyto podmínky způsobí vstup do podprogramu (viz obrázek 13). Následující kapitoly jsou odkazem obrázku 13.

5.1 Grafické zobrazení naměřených dat

Celý proces zobrazení grafických dat je spuštěn přetečením časovače a následným vstupem do přerušení a podprogramu „získej teplotní pole“.

Časovač je možno nastavit na 1 s nebo 100 ms podle možností senzoru GE zobrazovat v módech 1FPS a 10FPS.

Data jsou přijímána (viz kapitola 2.1) a současně přepočítávána podle

globálních proměnných `htemp` (horní mez teploty) a `ltemp` (spodní mez teploty) o velikosti 8bit. V těchto proměnných je uložena celočíselná hodnota teploty, podle které je nastavováno rozlišení grafického výstupu.

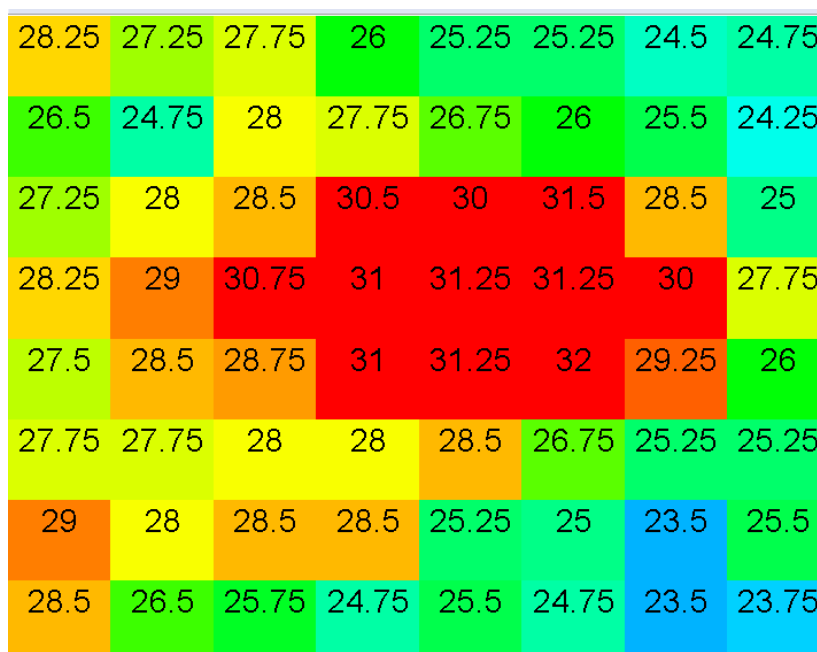
5.1.1 Přepočet absolutních hodnot teploty na grafickou reprezentaci

Cílem je barevná reprezentace teplot, tak jak je zobrazeno na obrázku 14. Aby bylo dosaženo tohoto efektu, je potřeba si barevné spektrum diskrétně navzorkovat určitým počtem vzorků (v našem případě 129) a tyto vzorky uložit do paměti kontroléru v 8bitovém RGB tvaru (jeden vektor pro každou chromatickou složku) – viz příloha 4. Poté stačí jednotlivé teploty přepočítat na hodnoty od 0 do 128. Výsledek – pokud jsou tyto hodnoty vloženy do vektorů RGB – je konkrétní kombinaci RGB složek pro určitou barvu z navzorkovaného spektra. Přepočet je realizován jednoduchým poměrem, jak je ukázáno v krátkém úryvku kódu:

```
ltemp<=2;
htemp<=2;
teplota-=ltemp;
ltemp=htemp-ltemp;
teplota<=7;
temp=teplota/ltemp;
color=temp;
```

kde `teplota` je reprezentantem absolutní hodnoty teploty (12bit) a `color` je výsledný vypočítaný „ukazatel“ na vzorek RGB barvy, který je vložen do vektoru o velikosti 64 hodnot s názvem `atemp`. Ten je zpětně rekonstruovatelný na matici 8x8.

V přerušení je dále přepisovaná proměnná, která informuje o vstupu do přerušení způsobené přetečením časovače. Díky této proměnné, po návratu programového čítače zpět do sekvence nekonečné smyčky, je zahájeno zpracování `atemp` a grafické zobrazení.



Obrázek 14: Ukázka grafického teplotního pole i s absolutními hodnotami teplot (Matlab GUI).

5.1.2 Číslíkové zpracování obrazu a jeho zobrazení

Výpočty jsou prováděny s RGB ekvivalenty (atemp) naměřených teplot, které jsou ve formátu `unsigned char`. To má za následek zkrácení výpočetního času a ušetření paměti kontroléru oproti výpočtům ve formátu `unsigned int`, ve kterém jsou teploty přijímány ze senzoru GE. Předpokladem je pevně určená hodnota `htemp` a `ltemp`.

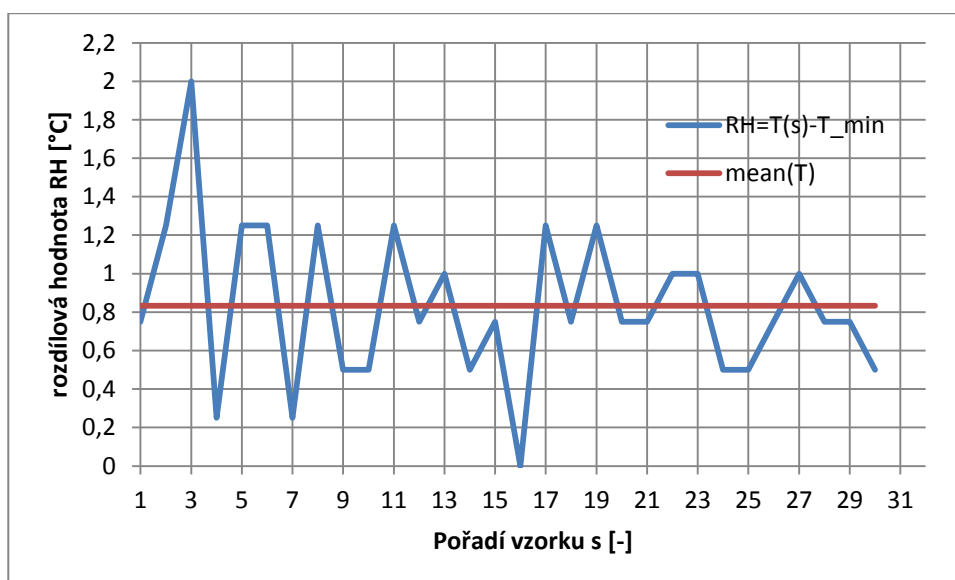
Jako první je provedeno průměrování se čtyřmi předcházejícími vzorky (posuvný rámeček). Funkce `avg_temp`:

```
unsigned char m =0;
while (m<65)
{
    *t5=(*t1 + *t2 + *t3 + *t4)>>2;
    t1++;t2++;t3++;t4++;t5++;
    m++;
}
```

Proměnné `t1` až `t4` jsou reprezentanty polí v proměnné `atemp`. Proměnná `t5` je ukazatel výsledného pole.

K tomuto účelu byla proměnná `atemp` definována jako pole o čtyřech polích velikosti 64. Při načítání hodnot teplot v přerušení časovače se tyto vnitřní pole postupně střídají.

Na obrázku 15 je vidět, že vlivem šumu je možno dosáhnout rozdílu získané teploty RH (obrázek 15) až 2° C (při teplotě pozadí 22,5°C, teplotě měřeného objektu 35,4°C a vzdálenosti 2,5m). Tento fakt vytváří velice rušivý efekt pro pozorovatele měnících se snímků.



Obrázek 15: Závislost pořadí vzorku na změřené teplotě stejného objektu.

Dalším krokem je interpolace. Zvolena byla lineární interpolace pro svoji

jednoduchost a lehkou implementovatelnost do 8bit kontroléru. Tyto výpočty provádí funkce `intra8to15` a `intra15to29`. Jak napovídají názvy funkcí, při interpolaci druhého řádu dostáváme matici o 29 prvcích.

X1	$Y1=(X2+X1)/2$	X2
$Y2=(X1+X3)/2$	$Z1=(Y1+Y2+Y3+Y4)/4$	Y4
X3	Y3	X4
X1 až X4		Původní body matice
Y1 až Y4 a Z1		Vypočtené body matice

Obrázek 16: Náznak výpočtu nové matice podle lineární interpolace.

Pro zobrazení teplotního pole na LCD display byly vytvořeny nové funkce `fillrect15` a `fillrect29`. Jedná se o totožné funkce s `fillrect` po určité optimalizaci. Jsou používány pro konkrétní řády interpolace.

5.2 Uživatelské menu řízené dotykovou vrstvou

Výsledná aplikace nabízí možnosti nastavení některých parametrů. Je ovšem potřeba tuto možnost zprostředkovat po uživatelsky přijatelné stránce. A to zaručí vytvoření menu, do kterého bude moci uživatel kdykoliv vstoupit a odejít.



Obrázek 17: Vyfotografovaný snímek LCD po vstupu do menu. Červenou barvou jsou naznačeny zóny stisknutí pro jednotlivá softwarová tlačítka.

Jak už bylo v předcházejících kapitolách (3.2) naznačeno, modul ITDB02 obsahuje LCD s dotykovou vrstvou a řídicím obvodem. Jedná se o obvod TSC2046 značky Texas Instruments [17]. Ke komunikaci s tímto obvodem byla jako základ pro knihovny `t_lib` použita volně přístupná knihovna `UTouch` [12].

Během kontaktu s odporovou vrstvou dochází k několikanásobnému přečtení

souřadnic kontaktu. Souřadnice jsou přepočítány na pozice pixelů LCD. I při získávání souřadnic dochází vlivem šumu k nahodilé nepřesnosti v řádu desítek bodů. Proto byla napsána funkce `avg_touch`, která průměruje přijaté souřadnice. Ovšem pouze ty, které se svojí pozicí neliší více než o 2 body. To zaručí přesné určení místa doteku.

Poté se ze získané souřadnice určí, které ze softwarových tlačítek je stisknuto a tím, i které příkazy je nutno vykonat. Zpracování souřadnic se vykonává ve stromové sekvenci větvicích se příkazů `if`. Ty jsou nastaveny podle zón znázorněných na obrázku 17. K určení jakékoliv zóny je potřeba maximálně třech větvení `if`.

Dostupné demo funkce jsou shrnuty v tabulce 12. Funkce `AUTOSET` přijme aktuálně pořízený snímek ze senzoru GE a nastaví `htemp` a `ltemp` podle největší a nejmenší nalezené teploty v matici 8x8.

Funkce s názvem `Max` úzce spolupracuje s řídícími registry senzoru GE. Při nastavení do určité teploty, je právě tato teplota uložena v registru senzoru GE. Ten slouží k vyvolání přerušení, pokud je tato teplota překročena. Registr, ve kterém je ukládán příznak přerušení je posílán do MCU s teplotním polem. Při překročení `Max` teploty, se v rohu displeje objeví červený trojúhelník.

Tabulka 13: Přehled dostupných funkcí v menu

Název	Popis
Rate	Přepíná časovač na 1FPS nebo 10FPS
AUTOSET	Nastaví rozlišení grafického výstupu
High	Zvolí htemp a poté je možno jej přenastavit
Low	Zvolí ltemp a poté je možno jej přenastavit
Max	Zvolí max a poté je možno jej přenastavit
$\pm 10 \pm 1$	Slouží k nastavení zvoleného registru
EXIT	Opustit menu

5.3 Matlabovské GUI a jeho komunikace s MCU

Součástí zadání této bakalářské práce je realizace komunikace embedded aplikace s grafickým prostředím v PC. V závěru kapitoly 4.2 byl zvolen způsob realizace komunikace pomocí modul s obvodem PL2303HX, který pomocí USB emuluje sériovou linku. Zde se přímo nabízí použití vývojového prostředí matlab, které skýtá velký množství již připravených modulů pro tvorbu grafického prostředí pracující v reálném čase.

5.3.1 PC mód

PC mód je stav kontroléru, ve kterém MCU zprostředkovává komunikaci PC se senzorem GE. MCU reaguje pouze na popud z PC. Pokud je kontrolérem zachycena na sériové lince žádost o autorizaci (viz tabulka 13), globální proměnná n se rovná třem. Poté je tato hodnota zachycena příkazem `if`, kterým se vykonávání programu dostane z hlavní nekonečné smyčky do podprogramu spravující komunikaci s PC. Ukázka funkce přerušení při události na komunikační lince UART:

```
ISR( USART_RXC_vect )
{
    s[n]=UDR;
    n++;
}
```

Podobným způsobem je realizován i podprogram PC mód, který se skládá z nekonečné smyčky. Z této smyčky vykonávání programu vystoupí na popud z PC.

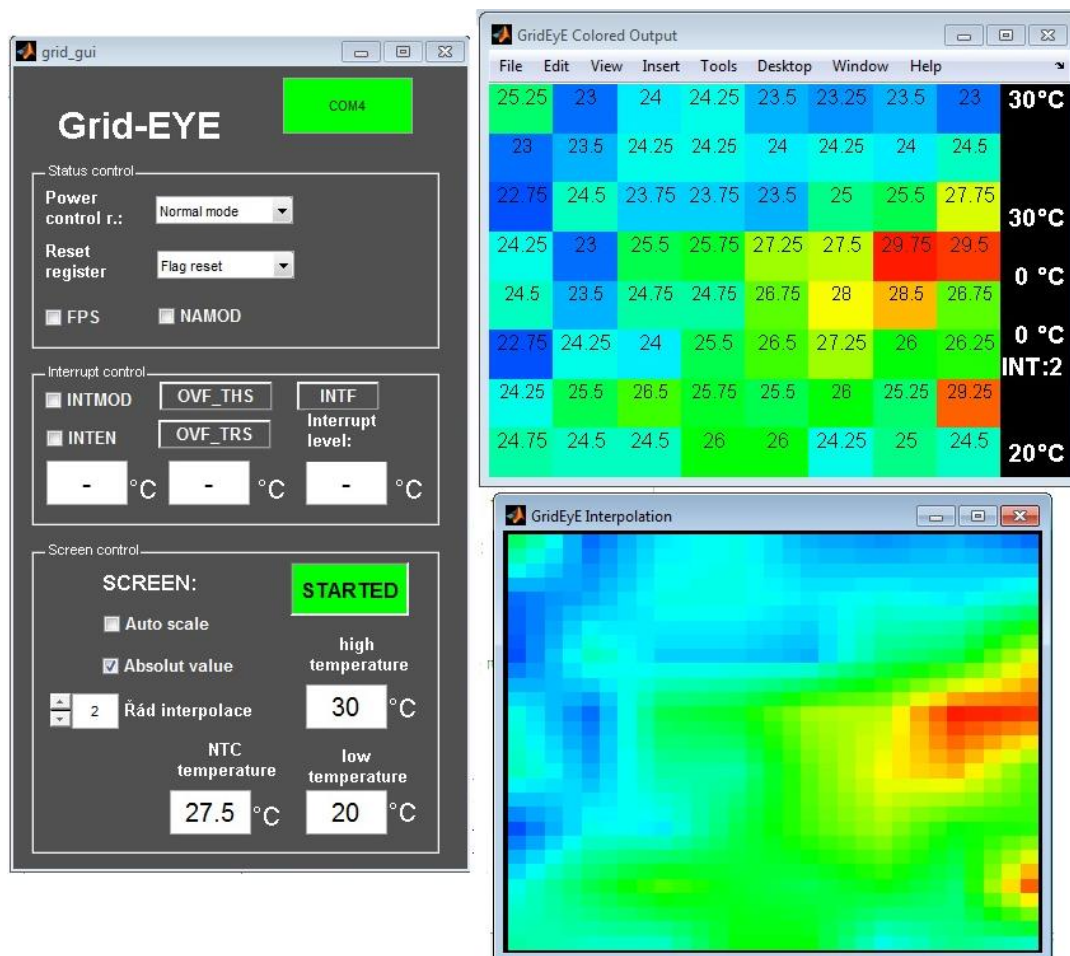
V rámci řešení toho problému byl vytvořen vlastní komunikační protokol. V tomto protokolu si musí PC strana data vyžádat. Vždy pošle 3 Byte (v některých požadavcích jsou data ve 2. a 3. Byte irelevantní, viz tabulka 12). Podle 1. Byte kontrolér zvolí příkaz k vykonání. Podrobnější popis je k nalezení v Tabulce 12.

Tabulka 14: Popis reakce kontroléru na 1. Byte vyslaný z PC v rámci komunikačního protokolu.

1. Byte	Popis významu
1	Pošle data všech 128 teplotních registrů + teplotu pouzdra + hodnoty úrovní přerušení + registr signalizující přerušení (137 Bytů)
2	Odešle data poslaná v 2. a 3. Bytu. Slouží k autorizaci přepnutí do PC módu (2 Byte)
3	Slouží k nastavení registrů senzoru na adrese poslané v 2. Bytu daty z 3. Bytu (0 Bytů)
4	Zašle nastavení FPS senzoru + stav řídicích registrů přerušení (2 Byte)
5	Slouží pro načtení dat z registru podle adresy v 2. Bytu (1 Byte)
6	Ukončí PC mód (0 Byte)

5.3.2 Seznámení s Graphical user interface

Graphical user interface neboli uživatelské grafické prostředí (ve zbytku práce jen GUI) slouží uživateli k ulehčení získávání dat a informací o zařízení. Výsledný vzhled GUI je zachycen na obrázku 18.



Obrázek 18: Konečný vzhled grafického uživatelského prostředí.

Před inicializací komunikace GUI s MCU je potřeba nastavit v horním rámečku zvolený COMport a poté odeslat správnou posloupnost Bytů (viz tabulka 13). Pokud jsou přijata správná data, uživatel může pokračovat v užívání GUI. Při zavření GUI jsou všechny vygenerované objekty vymazány z paměti a do MCU je zaslán příkaz k ukončení PC módu.

Řídící panel aplikace byl navrhnout tak, aby obsáhl všechny možnosti, které senzor skýtá. Tyto funkce jsou zahrnuty v oknech Status control a Interrupt control. Použité názvy a zkratky plynou přímo z dokumentace k senzoru GE [1]. V okně Interrupt control se do prázdných okýnek zapisují hodnoty pro nastavení přerušení vyvolané senzorem (dále jen threshold temps).

V okně Screen control jsou ovládány funkce implantované softwarově do GUI, viz tabulka 14. K návrhu panelu byl použit toolbox `guide`.

Tabulka 15: Popis funkcí v okně Screen control

Název funkce	Popis
Auto Scale	Při každém přečtení snímku se určí absolutní nejmenší a největší teplota a podle ní je nastaveno rozlišení grafické prezentace.
Absolut value	V okně GridEyE Colored Output se zobrazí v každém poli Absolutní hodnota teploty.
Řád interpolace	Nastavuje řád interpolace týkající se okna GridEyE interpolation
high temp.	Stejně jako proměnná <code>htemp</code> v kontroléru
low temp.	Stejně jako proměnná <code>ltemp</code> v kontroléru
NTC temp.	Hodnota vyčítaná z registrů Thermistor temperatur [1]

Externí okna GUI GridEyE Colored Output (dále jen GCO) a Grid EyE Interpolation (dále jen GI) jsou vytvořena jako objekty `figure`, které jsou otevřeny současně se spuštěním GUI. Matice teplotního pole je v objektu GCO vytvořena pomocí objektů `text` (Absolut value). V pravém informačním panelu GCO jsou zobrazeny (shora) `htemp`, aktuálně nastavené `threshold temps`. Obsah registru senzoru značí přerušení a `ltemp`. Teplotní grafické pole v GI je vytvořeno pomocí objektu `patch`. Pomocí `patch` se vytváří libovolné 2D objekty. V případě GI jsou takto nadefinovány matice čtverců podle řádu interpolace.

5.3.3 Popis softwarového vybavení GUI

Princip vykonávání příkazu v GUI si lze představit jako klasickou knihovnu funkcí, kde místo hlavičkového souboru je grafické rozhraní. Každý objekt, který je aktivní, má svoji funkci a jeho aktivací na tu to funkci zavolá. Tím se sekvence příkazů v dané funkci vykoná a není potřeba žádná nekonečné smyčky ani větvičích příkazů, jak je tomu při programování mikrokontrolérů.

Tím ovšem vzniká problém, jak periodicky vyčítat určitý objem dat a zpracovávat jej tak, aby aplikace pracovala v reálném čase. Řešením je matlabovský objekt zvaný `timer`. Ten skýtá velké množství možností nastavení a několik nástrojů pro jeho spravování. Při řešení GUI byla použita odezva `CallbackFcn`. Ta má za úkol po uplynutí nastaveného časového intervalu zavolat funkci nastavenou jako

CallBackFcn. V této funkci se pomocí objektu `serial` vyčítají data přímo z kontroléru. Ty jsou později zpracovány a zobrazeny v GCO a GI. Pro zpracování a zobrazení dat byly zvoleny stejné postupy jako v mikrokontroléru (viz 5.1.1). Průměrování nebylo implementováno z důvodu potřeby rychlé odezvy na prudké změny teplot při testování senzoru GE.

5.4 Ukazatel výdrže baterie

Uživatelsky nezbytnou funkcí každé aplikace napájené z přenosného zdroje je informovat uživatele o přibližném stavu baterie. Podrobnosti k této problematice byly popsány v kapitole 4.4.1. Jak již bylo zmíněno, byl vybrán A/D převodník ADS1000, tento převodník využívá ke komunikaci sběrnici I2C. Pro tento obvod byly napsány funkce pro jeho obsluhu. Ty se nalézají v knihovně `i2cmaster.h`. Ekvivalentní hodnota napětí je přečtena vždy při zapnutí zařízení, nebo při výstupu z menu.

V paměti kontroléru je uloženo pole sedmi ekvivalentů napětí (viz tabulka 16), reprezentující aproximovaný průběh vybíjení akumulátoru [15]. A/D převodník převádí napětí podle rovnice (5) ze zdroje [18].

$$c = 2048 * \left(\frac{V_{in}}{V_{cc}} \right) \quad (5)$$

V_{in} je napětí na vstupu A/D převodníku za odporovým děličem,

V_{cc} je napájecí napětí A/D převodníku,

c je hodnota převedeného napětí A/D převodníkem

Přijátá hodnota z A/D převodníku se postupně porovnává s celým polem a podle toho je vybrán počet bíle vybarvených obdélníků, které značí velikost napětí.

Tabulka 16: Hodnoty napětí aproximované vybíjecí křivky akumulátoru přepočteny na digitální ekvivalent. (V_{ak} je hodnot napětí na akumulátoru)

V_{ak} [V]	V_{in} [V]	c [-]
4,10	3,14	1946
4,03	3,08	1914
3,97	3,03	1882
3,90	2,98	1851
3,83	2,93	1819
3,77	2,88	1787
3,70	2,83	1756

Další částí je vytvoření informačního panelu, skládajícího se ze 6 obdélníků zařazených nad sebou a symbolu baterie.

6 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ A MĚŘENÍ

V této kapitole bude popsána realizace výrobku a také budou zveřejněny výsledky z měření.

6.1 Návrh schématického zapojení

Konstrukce zařízení patří mezi jedno ze zásadních aspektů vývoje. Odráží se v něm funkčnost, odolnost, rozměry a v neposlední řadě vzhled zařízení.

6.1.1 Návrh zapojení digitální části

Schematické zapojení se skládá ze dvou úseků. Jeden z nich se zabývá návrhem digitální části. V tomto oddíle je popsáno zapojení MCU s ostatními perifériemi (viz obrázek 10). Obvod je zapojen na základě rozboru v teoretické části práce. Zapojení kontroléru Atmega32A je převzato z [13]. Počítá se s dalším softwarovým vývojem, a proto musel být do schématu začleněn konektor pro ISP.

Senzor GE byl zapůjčen firmou CSRC s. r. o, která jej zapůjčila již na hotovém přípravku s vlastním stabilizátorem napětí. K tomuto přípravku bylo třeba zapojení napájení 3,3 V, SDA, SCL a zemnicí vodič GND. Tyto vodiče jsou vyvedeny v konektoru s názvem LISTA5. Další konektor s názvem LISTA1 slouží k připojení modulu PL2303HX. Před vstupem do i/o pinu MCU, který v tomto zapojení slouží jako linka pro Downlink, je zapojen odporový dělič. Ten převádí TTL logiku 5 V na 3,3 V. Sousední linka určená pro Uplink není na změnu úrovně ošetřena. Rozsah rozhodovací úrovně TTL logiky pro vysokou úroveň toto napětí 3,3 V obsáhne.

Nepoužité vývody PD2 a PD3 kontroléru jsou vyvedeny na LISTA10 a LISTA11. S jejich použitím nebylo počítáno, ovšem mohou být v rámci vývoje použity například pro signalizační LED nebo při měření rychlosti vykonání určitých úseků kódu nahraného v MCU.

Do digitální části také patří A/D převodník ADS1000. Ten je zapojen podle doporučení výrobce [18]. Nároky na přesnost převodu jsou nízké, a proto nebylo třeba galvanické oddělení napájení a signálových vodičů SDA a SCL. Integrovaný obvod má vyveden pouze jeden zemnicí vodič a ten je připojen na společný zemnicí vodič ostatních obvodů.

6.1.2 Návrh zapojení napájecí části

Druhá část schématického zapojení slouží k zajištění konstantního napájecího napětí 3,3 V pro číslicovou část. Obvod je zapojen podle obrázku 12. Tato kapitola navazuje na kapitolu 4.4, kde jsou shrnuty základní teoretické poznatky. Použité integrované obvody jsou zapojeny podle doporučení výrobce.

Před vstupem do A/D převodníku je zařazen odporový dělič, ten snižuje maximální napětí akumulátoru na hodnotu 3,2 V. Spínač JP1 slouží k zapnutí aplikace, při jeho sepnutí je na vstup napěťového stabilizátoru připojeno kladné napětí z akumulátoru. Napětí akumulátoru je připojena na A/D převodník až po sepnutí JP1, tím je zabráněno

parazitnímu vybíjení přes odporový dělič v době nečinnosti.

USB port je chráněn proti překročení maximálního proudového odběru proudovou pojistkou. Jedná o se rychlou pojistku v pouzdře 0603 s dobou reakce 10 ms.

6.2 Návrh plošného spoje a osazení do krabičky

Návrhu plošného spoje předcházel výběr konstrukční krabičky. Z výběru komerčně dostupných krabiček byla zvolena PP73N. Tato krabička je určena pro montáž protipožárních senzorů, tomu odpovídá žebrování na stranách krabičky, které v našem případě není žádoucí. Na druhou stranu vyhovuje svými rozměry a způsobem upevnění DPS.

Cílem je, aby LCD bylo umístěno na vrchní straně krabičky a bylo pohodlně dostupné pro ovládání doteky prstů nebo jiných předmětů. Čočka senzoru GE musí být umístěna tak, aby byla zaměřena na prostor za krabičkou (za LCD, fotoaparát), tudíž na spodní straně krabičky. Modul se senzorem GE bude umístěn na distančních sloupcích. Modul ITDB02 bude pevně připojen v patici na DPS a podpírán pomocnými sloupky. Použité konektory budou také umístěny přímo na DPS. Tento způsob uchycení klade velké nároky na přesnost umístění DPS v krabičce. Výhodou je demontovatelnost modulu ITDB02.

Akumulátor bude uchycen na horní straně desky pod modulem ITDB02. Od vodivé vrstvy bude izolován podložkou. Spínač JP1 bude přichycen na stěně krabičky.

6.2.1 Návrh DPS

Z rozměrů zvoleného typu krabičky byly odvozeny rozměry DPS a rozložení otvorů pro montáž desky plošných spojů. Patice pro ITDB02 (dále jen patice) musíme umístit tak, aby výsledná pozice LCD byla uprostřed vrchní strany krabičky. MCU má s ITDB02 společných 25 pinů. Rozvedení těchto pinů je velice problematické, také z toho důvodu, že patice je umístěna na kraji DPS. Tento problém byl řešen tak, že jedna řada patice (22 pinů) byla vyvedená na dolní vrstvu DPS a druhá řada na horní vrstvu.

V aplikaci se nevyskytují tak velké proudy, aby bylo nutné rozdělení zemnicí smyčky. Obvodem LTC4054 ve stavu nabíjení může protékat až 380 mA. Tento obvod je chlazen podle doporučení výrobce rozlitím měděné vrstvy (země) pod pouzdrem součástky. Tato vrstva je také v okolí součástky prokovy spojena s měděnou vrstvou na druhé straně desky, tím je odvod tepla ze součástky ještě efektivnější.

V desce plošných spojů bude vyříznut obdélníkový otvor. Tímto otvorem bude vedena kabeláž z modulu s GE senzorem ke konektoru na horní straně DPS.

6.3 Měření

V této kapitole budou zveřejněny veškeré výsledky měření provedené na hotovém přípravku a senzoru GE.

6.3.1 Doba zpracování a zobrazení data přijatých z Grid-EyE

Jedná se o dobu, za kterou kontrolér přijatá data zprůměruje, provede interpolaci a zobrazí na LCD ve formě graficky vyjádřeného teplotního pole. Jinými slovy, je to doba vykonání všech operací, které se periodicky opakují s každou periodou přetečení interního čítače. Doba čtení dat přes sběrnici I2C není započítávána, ale změřená zvlášť.

Na nepoužitý pin MCU PD2 byl softwarově přiveden obdélníkový signál se šířkou pulzu měřené doby. Perioda signálu vyplývá z nastavení interního čítače na 100 ms. Pomocí osciloskopu GwINSTEK GDS-806C byla tato šířka pulzu změřena. Stejným způsobem byla změřena doba komunikace MCU se senzorem GE a převod teplot z absolutních hodnot na chromatický ekvivalent. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 17.

Tabulka 17: Doba zpracování a zobrazení dat.

Řád interpolace	Změřená doba	Název funkce
průměrování	0,6 ms	avg_temp
1. řád interpolace	1,14 ms	intra8to15
2. řád interpolace	67,4 ms	intra8to15
Doba komunikace	3,2 ms	ISR(TIMER1_OVF_vect)
Doba zobrazení	0,9 ms	LCD_temp_full_X

6.3.2 Naměřené parametry napájecí části

Úkolem těchto měření je zjistit základní údaje týkající se správy akumulátoru jako je přibližný čas nabíjení a přibližný čas vybíjení. Dále bude změřena teplota LTC4054 při dodávání maximálního proudu do zátěže. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 18.

Tabulka 18 Naměřené parametry napájecí části.

Veličina	Teoretická hodnota	Změřená hodnota
Vstupní proud (nabíjí akumulátor)	55 mA	52,8 mA
Vstupní proud při nabíjení akumulátoru	$380 \text{ mA} + 55 \text{ mA} = 435 \text{ mA}$	240 mA
Doba nabíjení akumulátoru	-	3 h 30 min
Doba vybíjení akumulátoru	cca 11 h	nezměřeno

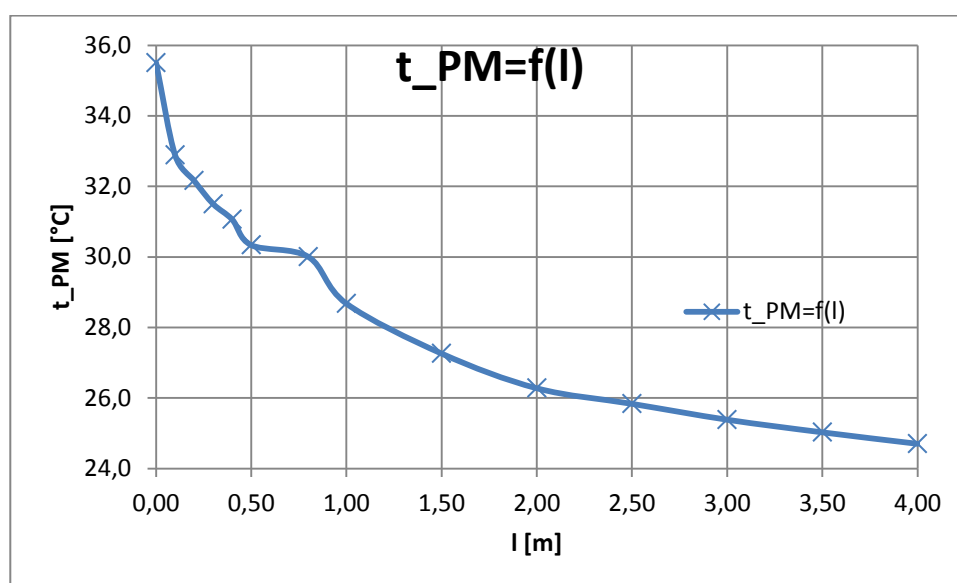
Změřená hodnota nabíjecího proudu je 240 mA. Výsledek se liší od teoretické hodnoty. Ovšem musí být brán zřetel na proměnný charakter nabíjecího cyklu a další parametry. Tento údaj není pro řešení zadání zásadní. Teoretická doba vybíjení byla určena z vybíjecích charakteristik uvedených výrobcem (viz [15]). Tato hodnota nebyla ověřena měřením z důvodů časové náročnosti.

Teplota nabíječe LTC4054 při maximálním nabíjecím proudu dosahuje teploty 48° C při okolní teplotě 22° C. Při tak nízké teplotě není potřeba LTC4054 chladit jinými prostředky. Měřeno termokamerou FLIR i3.

6.3.3 Měření na senzoru Grid-EyE

Měření proběhlo za pomoci figuranta. Normála čočky senzoru byla zaměřená na čelo figuranta. Ten se postupně vzdaloval do té doby, dokud jeho teplotní stopa nesplynula s pozadím. Pomocí teplotní kamery FLIR i3 byla figurantovi na čele změřena teplota 35,4° C. Měření probíhalo v místnosti s teplotou 22,5° C.

Za účelem efektivnějšího měření byl v prostředí MATLAB napsán skript s názvem `mereni.m`. Ten po spuštění změří 30x teplotní pole a uloží do globální proměnné, která narůstá s každým spuštěním. Z každého pole je vybrána největší teplota. Na konci měření je z těchto teplot vypočítán průměr (t_{PM}) a uložen do další globální proměnné. Výsledky měření jsou uloženy do souboru `vysledky.mat`, z tohoto souboru jsou uložené hodnoty z měření znovu vyvolatelné. Naměřené výsledky jsou graficky vyjádřeny na obrázku 19. Konkrétní hodnoty jsou k nalezení v příloze 12.



Obrázek 19: Závislost naměřené t_{PM} na vzdálenosti GE a figuranta.

Skript `mereni.m` byl také použit pro měření vlivu šumu na měřené teplotní pole, jak znázorňuje obrázek 15.

7 ZÁVĚR

Obsahem práce je seznámení s infračerveným senzorem Grid-EYE od firmy Panasonic. Tento senzor byl zapůjčen společností CSRC s. r. o v rámci spolupráce na vývoji nových aplikací s tímto senzorem.

Dále jsou popsány možnosti komunikačních rozhraní mezi mikrokotrolérem, senzorem GE a počítačem. Včetně rozboru jednotlivých rozhraním, byla také provedena jejich časová analýza na základě teoretických poznatků.

Bylo vybráno nejvhodnější z možných zapojení demo aplikace, na základě kterého byl zhotoven funkční výrobek. Snahou autora bylo vytvořit takový prototypový výrobek, který bude sloužit jako základní kámen k vývoji zařízení určeného i pro komerční použití. Výsledná demo aplikace by měla sloužit jako mobilní přístroj snímající teplotní pole, které je posléze graficky zobrazováno na barevném displeji. Za tímto účelem byla část návrhu věnována prvkům aplikace, které se senzorem jako takovým úplně nesouvisí. Cena výrobku je odhadována na 1100 Kč mimo ceny samotného senzoru, který je na trhu dostupný jen v tisících kusů. Odhadovaná cena jednoho senzoru je 800 Kč.

Aplikace je přizpůsobena ke komunikaci s PC po USB. V rámci této práce bylo navrženo uživatelské prostředí s možností komunikovat se všemi interními přístupnými registry senzoru Grid-EyE a navíc se schopností přijímat a zpracovávat data posílaná senzorem v reálném čase. Toto prostředí je vhodné pro testování senzoru v reálných podmínkách.

Se senzorem Grid-EyE bylo provedeno několik měření v laboratorních podmínkách. Z výsledků měření je zřejmé, že na změřenou teplotu objektu má velký vliv jejich vzájemná vzdálenost. Proto není vhodné jej použít k měření absolutní hodnoty teploty.

Senzor Grid-EyE ovšem nalezne široké uplatnění v takových aplikacích, kde nebude záležet na absolutní hodnotě teplot. V aplikacích, které budou sloužit spíše k detekci rozdílu teplot jak v čase, tak v prostoru.

LITERATURA

- [1] PANASONIC ELECTRIC WORKS. *SPECIFICATIONS FOR Infrared Array Sensor*. 2011, 27 s.
- [2] SPIEGLER, R. Prezentace pro Panasonic Electric Works, *Gride-EYE*. 2012
- [3] FRYZA, T., ŠEBESTA, J., FEDRA, Z., ZELINKA, P. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy, Počítačová cvičení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [4] FLEURY, P [online]. 2005 [cit. 2012-11-19]. Knihovna *I2Cmaster*. Dostupné z WWW: <<http://jump.to/fleury>>.
- [5] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMELE AVR: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-7300-174-8
- [6] MANN, Burkhard. *C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMELE AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky*. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-7300-077-6.
- [7] TIŠNOSVSKÝ, P [online]. 2009 [cit. 2012-11-19]. Článek *Komunikační protokol univerzální sériové sběrnici*. Dostupné z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/komunikacni-protokol-universalni-seriove-sbernice/>>.
- [8] TIŠNOSVSKÝ, P [online]. 2009 [cit. 2012-11-19]. Článek *Přenos dat po univerzální sériové sběrnici*. Dostupné z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/prenos-dat-po-universalni-seriove-sbernici/>>.
- [9] SMRŽ, J *Implementace USB rozhraní AVR mikrořadiče*: Diplomová práce. Praha: FE ČVUT v Praze, 2008. 87., 1 příl.
- [10] ITEAD STUDIO [online]. 2012 [cit. 2012-11-21]. 2.4" TFT LCD : ITDB02-2.4E. Dostupné z WWW: <<http://imall.iteadstudio.com/display/tft-lcm/im120419004.html>>.
- [11] MATYÁŠ, P., HRACH P.[online]. 2011 [cit. 2012-11-19]. *Knihovna pro grafický displej ITDB02*. Projekt MMIA 2011. Brno: FEKT VUT v Brně. Dostupné z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA/2011/Matyas/index.html>>
- [12] KARLSEN, H [online]. 2011 [cit. 2012-11-21]. Library: ITDB02_Graph a UTouch. Dostupné z WWW: <<http://www.henningkarlsen.com>>.
- [13] ATMEL CORPORATION [online]. 2012 [cit. 2012-11-21]. AVR Atmega32A. Dostupné z WWW: <<http://atmel.com>>.
- [14] FTDI chip [online]. 2012 [cit. 2012-11-21]. USB Device solution. Dostupné z WWW: <<http://ftdichip.com>>.
- [15] TME.cz [online] 2013 [cit. 2013-5-2] SANYO UF463048F Dostupné z WWW: <<http://www.tme.eu/cz/details/accu-uf463048f/akumulatory/sanyo/uf463048f/#>>
- [16] GME.cz [online] 2013 [cit. 2013-5-2] NT1854 Dostupné z WWW: <<http://www.gme.cz/vyhledavani/?q=NT1854>>
- [17] Ti.com [online] 2013 [cit. 2013-5-3] TSC2046 Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/product/tsc2046>>

- [18] Ti.com [online] 2013 [cit. 2013-5-3] *ADS1000* Dostupné z WWW:
 <<http://www.ti.com/product/ads1000>>
- [19] Linear.com [online] 2013 [cit. 2013-5-3] LTC4054-4.2 Dostupné z WWW:
 <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/405442xf.pdf>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACK	Acknowledge, potvrzení
AD	Analog to digital
CS	Chip select, výběr čipu
DPS	Deska plošných spojů
FPS	Frame per second, snímků za sekundu
GCO	Graphical Control Output (Název z 5.3)
GE	Grid-EYE
GI	Graphical interpolation (Název z 5.3)
GND	Uzemnění
GUI	Graphical user interface, uživatelské grafické prostředí
HID	Human interface device, zařízení pro komunikaci s uživatelem
HUB	rozbočovač
HW	Hardware
I2C	Inter-Integrated Circuit
INT	Interrupt
LCD	Liquid crystal display, displej na bázi tekutých krystalů
LED	Light emitting diode, luminiscenční dioda
LSB	Least significant bit, nejméně významný bit.
MCU	Machine control unit, řídicí jednotka
MEMS	Micro electro mechanical systems, elektromechanické systémy v řádu mikrometrů
MSB	Most significant bit, nejvíce významný bit
NACK	No ACK, nepotvrzený
PC	Personal computer, osobní počítač
RD	Read data, čti data
RG	Red green, červená a zelená
RGB	Red green blue, červená zelená a modrá
RS	Register select, vyber registr
RST	Reset, smazat
SCL	Session control layer, relační řídicí vrstva

SD	Super density disc, disk s vysokou hustotou záznamu
SDA	Swappable data area, datový kanál
SMD	Surface mounted device, součástka pro povrchovou montáž
SMT	Surface mounted technology, viz SMD
SW	Software
TFT	Thin film transistor, tenkovrstvý tranzistor
TTL	Transistor-Transistor-Logic
USART	Universal synchronous asynchronous receiver transmitter, synchronně asynchronní přijímač vysílač
USB	Universal serial bus, univerzální sériová sběrnice
WR	Write, zápis

SEZNAM PŘÍLOH

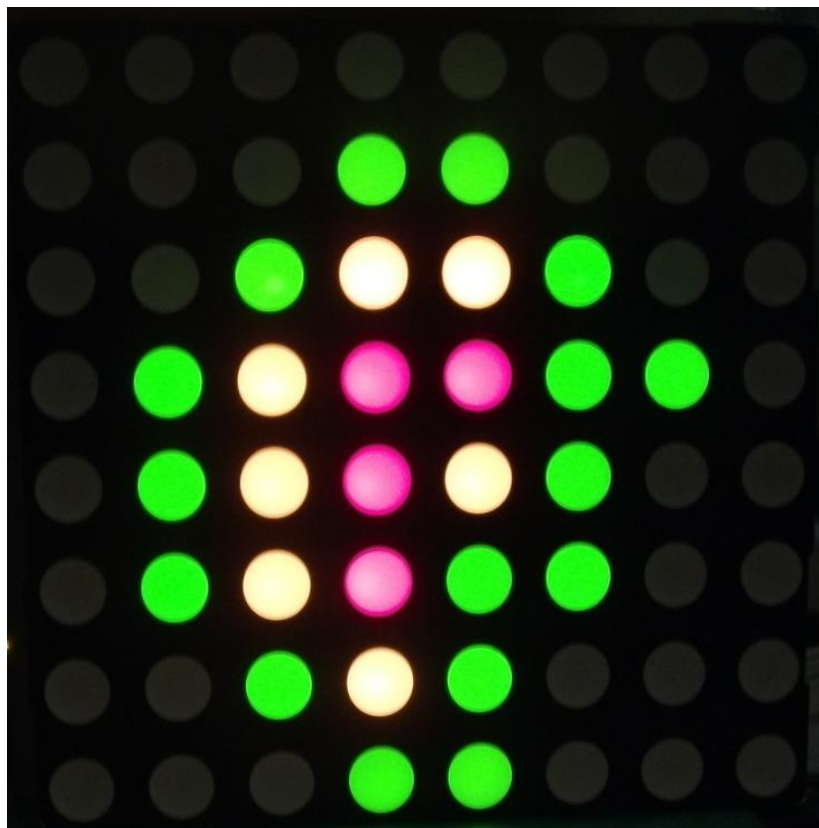
Příloha 1: Obsah knihovny [10].....	43
Příloha 2: Snímek 8x8 RG led displeje	44
Příloha 3: Funkce I2C_nastav_reg, I2C_read_reg a I2C_read_temp_int	45
Příloha 4: Definice RGB ekvivalentů uložené v paměti FLASH kontroléru.....	47
Příloha 5: Schéma zapojení číslicové části.....	48
Příloha 6: Schéma zapojení napájecí části	49
Příloha 7: Seznam použitých součástek	50
Příloha 8: Předloha horní strany desky	51
Příloha 9: Osazovací plán součástek horní strany desky	52
Příloha 10: Předloha spodní strany desky	53
Příloha 11: Osazovací plán součástek spodní strany desky	54
Příloha 12: Závislost naměřené hodnoty teploty objektu na vzdálenosti od senzoru	55
Příloha 13: Fotografie hotového výrobku.....	56

Příloha 1: Obsah knihovny [10]

Grafické objekty	
Hlavička funkce	Poznámka
<code>void drawRect(int x1, int y1, int x2, int y2, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí obdélník
<code>void fillRect(int x1, int y1, int x2, int y2, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí plný obdélník
<code>void fillCircle(int x, int y, int radius, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí vyplněnou kružnici
<code>void drawHLine(int x, int y, int l, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí horizontální linku
<code>void drawVLine(int x, int y, int l, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí vertikální linku
<code>void drawCircle(int x, int y, int radius, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí kružnici
<code>void drawLine(int x1, int y1, int x2, int y2, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	linka z [x1,y1] do [x2,y2]
<code>void drawBitmap(int x, int y, int sx, int sy, unsigned int* data);</code>	vykreslí bitmapový obrázek
Výpis textu	
Hlavička funkce	Poznámka
<code>void printChar(uchar c, int x, int y);</code>	vykreslí jeden znak
<code>void print(char *st, int x, int y, int deg);</code>	vykreslí text
<code>void printNumI(long num, int x, int y);</code>	vykreslí celé číslo
<code>void fontSize(unsigned char size);</code>	nastaví velikost písma
<code>void printNumF(double num, unsigned char dec, int x, int y);</code>	vykreslí desetinné číslo
Jiné funkce	
Hlavička funkce	Poznámka
<code>void InitLCD(void);</code>	inicializace displeje
<code>void clrScr(void);</code>	vymazání obsahu displeje
<code>void setColor(unsigned char r, unsigned char g, unsigned char b);</code>	nastaví barvu formátu
<code>void setBackColor(uchar r, uchar g, uchar b);</code>	nastaví barvu pozadí
<code>void setPixel(unsigned char r, unsigned char g, unsigned char b);</code>	nastaví barvu pixelu
<code>void fillScr(unsigned char r, unsigned char g, unsigned char b);</code>	vyplní disp. zvolenou barvou
<code>void drawPixel(int x, int y, uchar r, uchar g, uchar b);</code>	vykreslí jeden pixel

Pozn. Datový typ unsigned char je u některých proměnných zkrácen na uchar, z důvodu úspory místa.

Příloha 2: Snímek 8x8 RG led displeje



Příloha 3: Funkce I2C_nastav_reg, I2C_read_reg a I2C_read_temp_int

```

/*****
    nastav ridici registr ve slave

Input:      ad_reg = dresa registru ve slave
            data = slovo urcene k zapisu do ad_reg
*****/
void nastav_reg( unsigned char ad_reg, unsigned char data )
{
    i2c_start_wait(slave_ad+write);
    // nastav slave adresu plus zapis
    i2c_write(ad_reg);
    i2c_rep_start(slave_ad+write);
    //nastav slave adresu plus zapis
    i2c_write(data);
    i2c_stop();
}/* nastav_reg */

/*****
    precti register ve slave

Input:      ad_reg = adresu registru ve slave
Return:     vrati slovo ze slave registru ad_reg
*****/
unsigned char read_reg( unsigned char ad_reg)
{
    i2c_start_wait(slave_ad+write);
    //nastav slave adresu plus zapis
    i2c_write(ad_reg);
    i2c_rep_start(slave_ad+read);
    //nastav slave adresu plus cteni
    unsigned char ret;
    ret = i2c_readNak();
    i2c_stop();

return ret;

}/*read_reg */

/*****
    precti registry od 0x80 do 0xFF ze slave a uloz do pole
    teploty[64]
*****/
unsigned int teploty[64];
//promena "teploty" je definova v i2cmaster.h
void i2c_read_temp(void)
{
    unsigned int *pointer;

```

```
pointer = &teploty[63];
//adresa poslední bunky "teploty"
i2c_start_wait(slave_ad+write);
// nastavení slave adresy plus zapis
i2c_write(0x80);
// adresa registru od kterého se bude číst = 0x80
i2c_rep_start(slave_ad+read);
// nastavení slave adresy plus čtení
for(unsigned char m = 0;m<63;m++)
//63 cyklu po skončení-> "pointer" ukazuje na první bunku -
//"teploty"
{
    *pointer = i2c_readAck();
    *pointer |= (i2c_readAck())<<8;
    //výsledkem 16bit hodnota v jedné bunce

    pointer--;
}
*pointer = i2c_readAck();
//zapis hodnoty do první bunky "teploty"
*pointer |= (i2c_readNak())<<8;
i2c_stop();
}/*read_reg */
```


Příloha 4: Definice RGB ekvivalentů uložené v paměti FLASH kontroléru

```

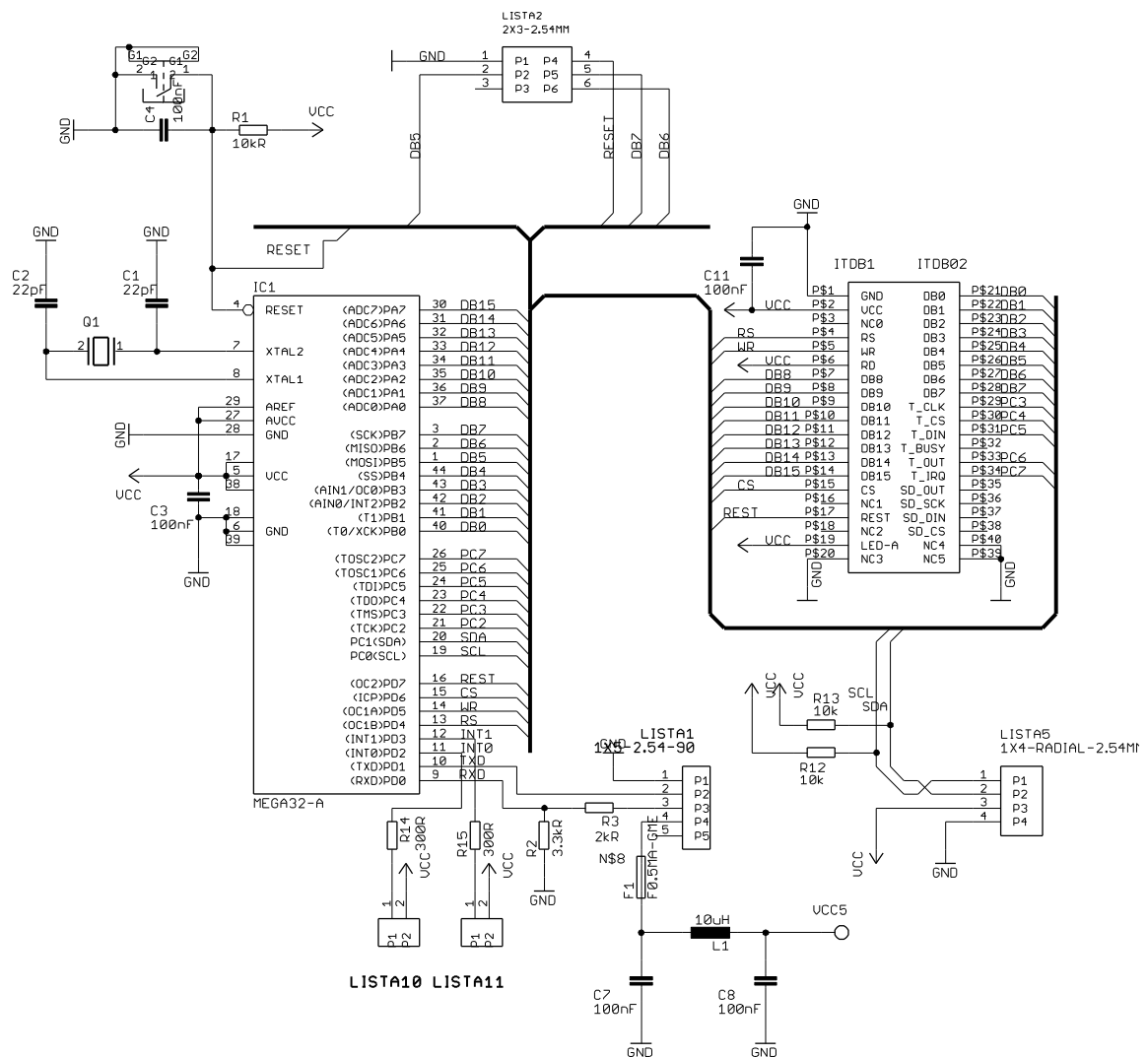
const unsigned char R[129] PROGMEM={
255,255,245,235,225,215,205,195,185,175,165,155,145,135
,126,116,106,96,86,76,66,56,46,36,26,16,6
,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
,10,20,30,40
,50,60,70,80,90,100,110,120,129,139,149
,159,169,179,189,199,209,219,229,239,249
,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255
};

const unsigned char G[129] PROGMEM={
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,10,20,
30,40
,50,60,70,80,90,100,110,120,129,139,149
,159,169,179,189,199,209,219,229,239,249
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,245,235,225,215,205,195,185,175,165,155,145,135
,126,116,106,96,86,76,66,56,46,36,26,16,6,0,0
};

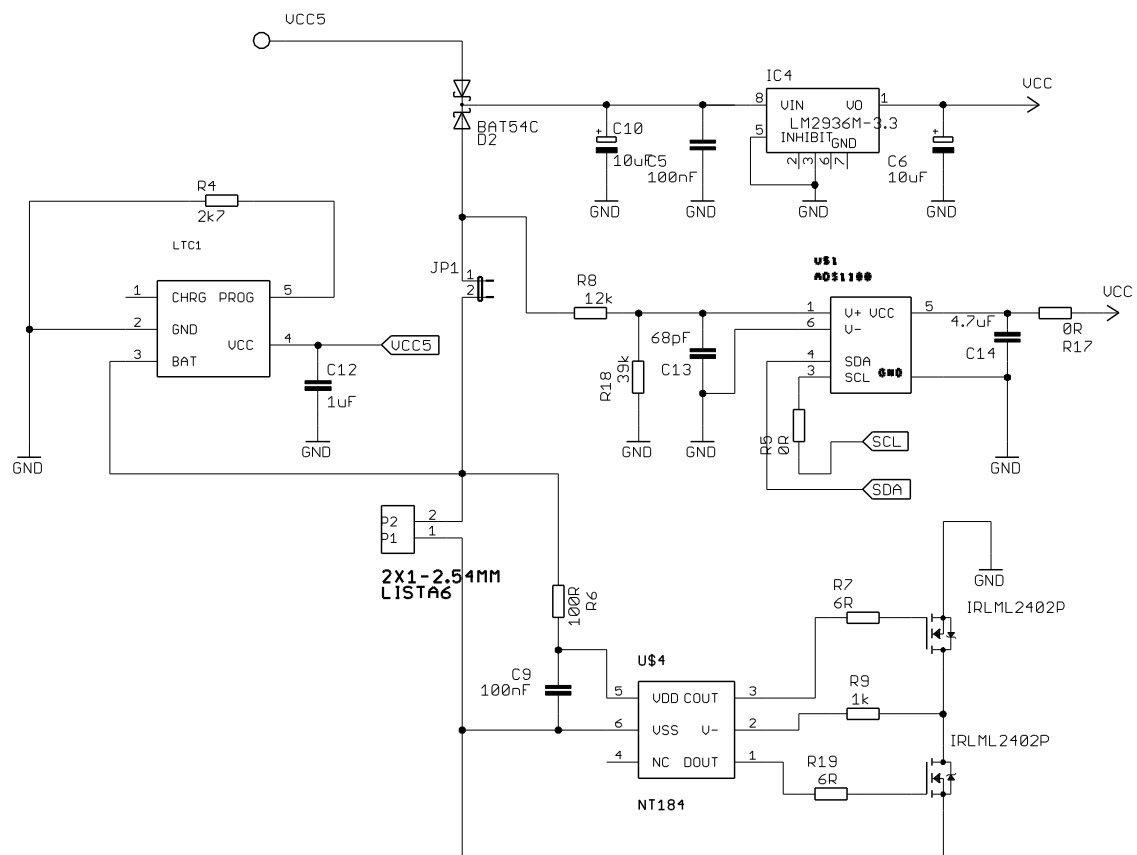
const unsigned char B[129] PROGMEM={
255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255,255
,245,235,225,215,205,195,185,175,165,155,145,135
,126,116,106,96,86,76,66,56,46,36,26,16,6
,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
,0,0
};

```

Příloha 5: Schéma zapojení číslicové části.



Příloha 6: Schéma zapojení napájecí části

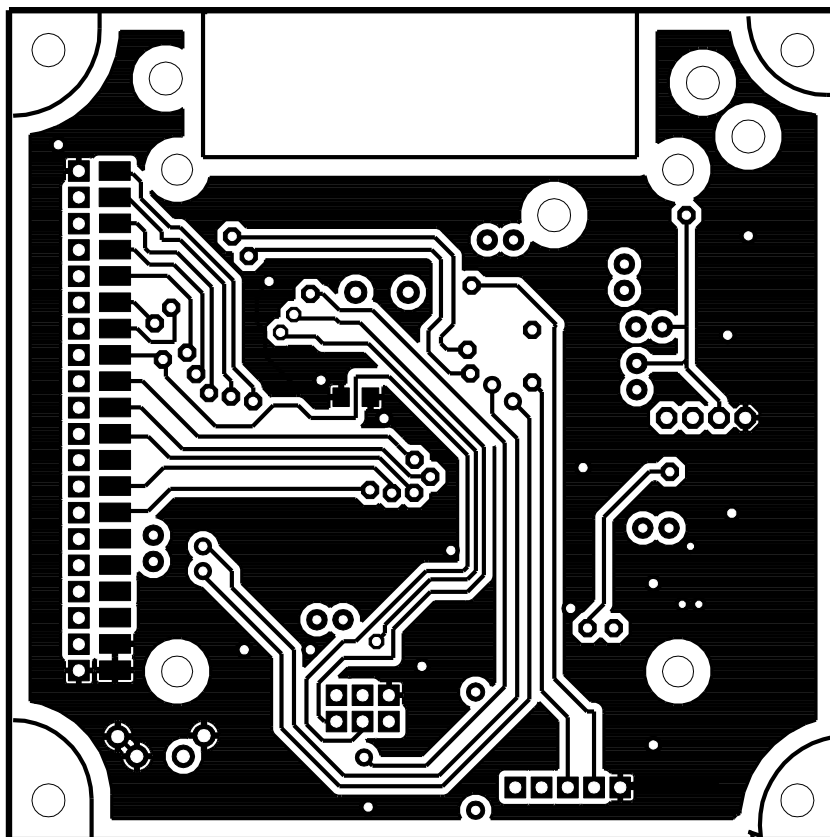


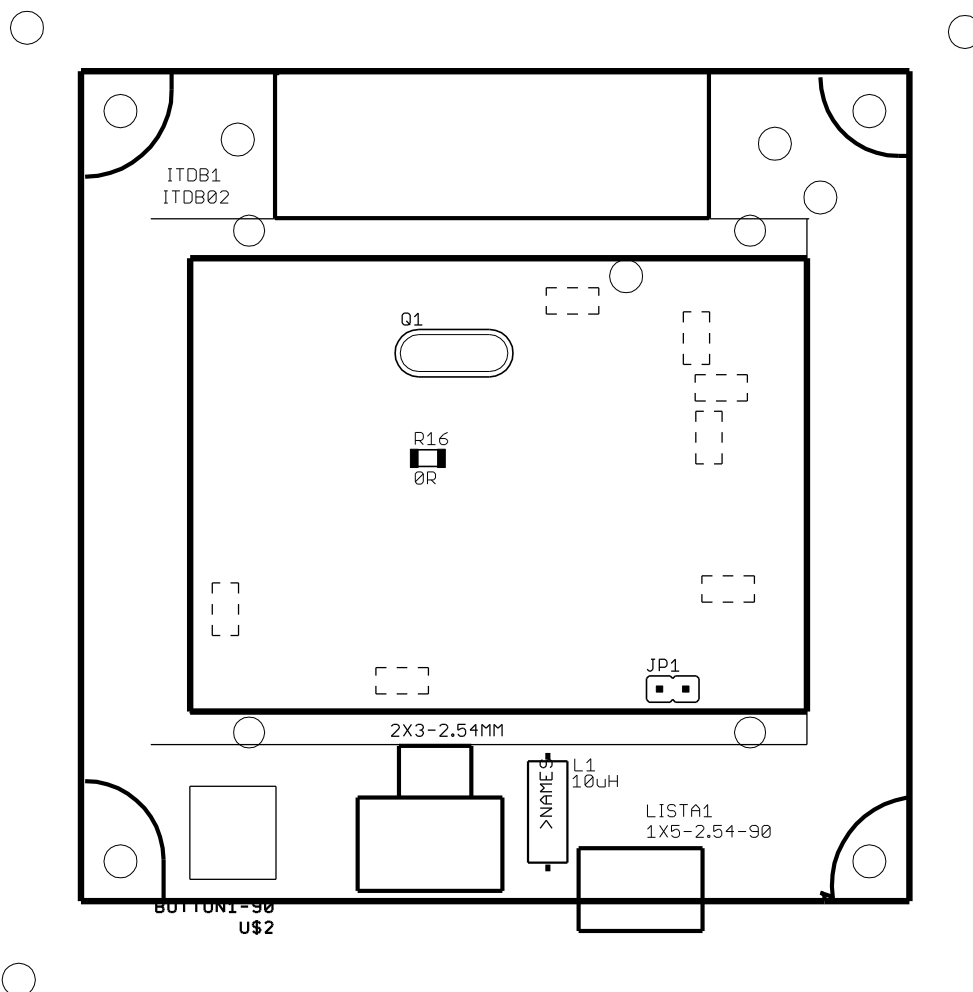
Příloha 7: Seznam použitých součástek

Qty	Value	Device	Parts
1		JP1E	JP1
1		LTC4054-4.2	LTC1
5	0R	R-EU_R1206	R5, R10, R11, R16, R17
1	1X4-RADIAL-2.54MM	1X4-RADIAL-2.54MM	LISTA5
1	1X5-2.54-90	1X5-2.54-90	LISTA1
1	1k	R-EU_R0805	R9
1	1uF	C-EUC0805	C12
3	2X1-2.54MM	2X1-2.54MM	LISTA6, LISTA10, LISTA11
1	2X3-2.54MM	2X3-2.54MM	LISTA2
1	2k7	R-EU_R0805	R4
1	2kR	R-EU_0204/5	R3
1	3.3kR	R-EU_R1206	R2
1	4.7uF	C-EUC0603	C14
1	6R	R-EU_R0805	R19
1	6R	R-EU_R1206	R7
2	10k	R-EU_R1206	R12, R13
1	10kR	R-EU_R1206	R1
2	10uF	CPOL-EU	C6, C10
1	10uH	L-EU2200-11.43	L1
1	12k	R-EU_R0805	R8
1	16MHz	XTAL/S	Q1
2	22pF	C-EUC1206	C1, C2
1	39k	R-EU_R0805	R18
1	68pF	C-EUC0603	C13
1	100R	R-EU_R0805	R6
1	100nF	C-EUC0805	C11
1	100nF	C-EUC0805K	C9
5	100nF	C-EUC1206	C3, C4, C5, C7, C8
2	300R	R-EU_R1206	R14, R15
1	ADS1100	ADS1100	U\$1
1	BAS40-05	BAS40-05	D2
1	BUTTON1-90	BUTTON1-90	U\$2
1	F0.5MA-GME	F0.5MA-GME	F1
2	IRLML2402P	IRLML2402P	U\$5, U\$6
1	ITDB02	ITDB02	ITDB1
1	LM2936M-3.3	LM2936M-3.3	IC4
1	MEGA32-A	MEGA32-A	IC1
1	NT184	NT184	U\$4

Příloha 8: Předloha horní strany desky

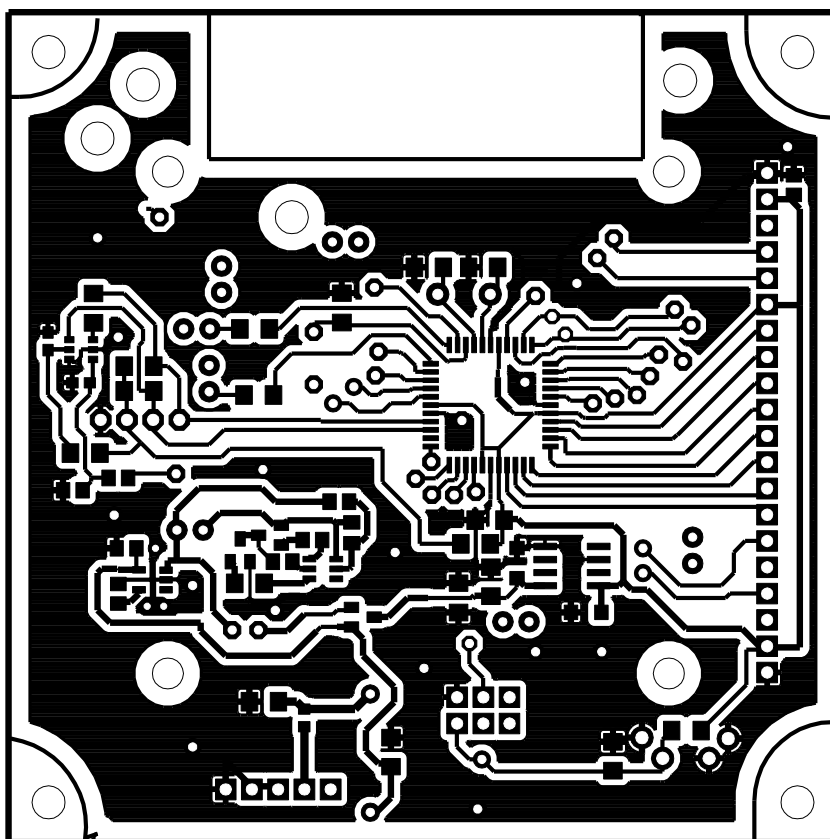
MANAS/GE_MODUL/TOP/



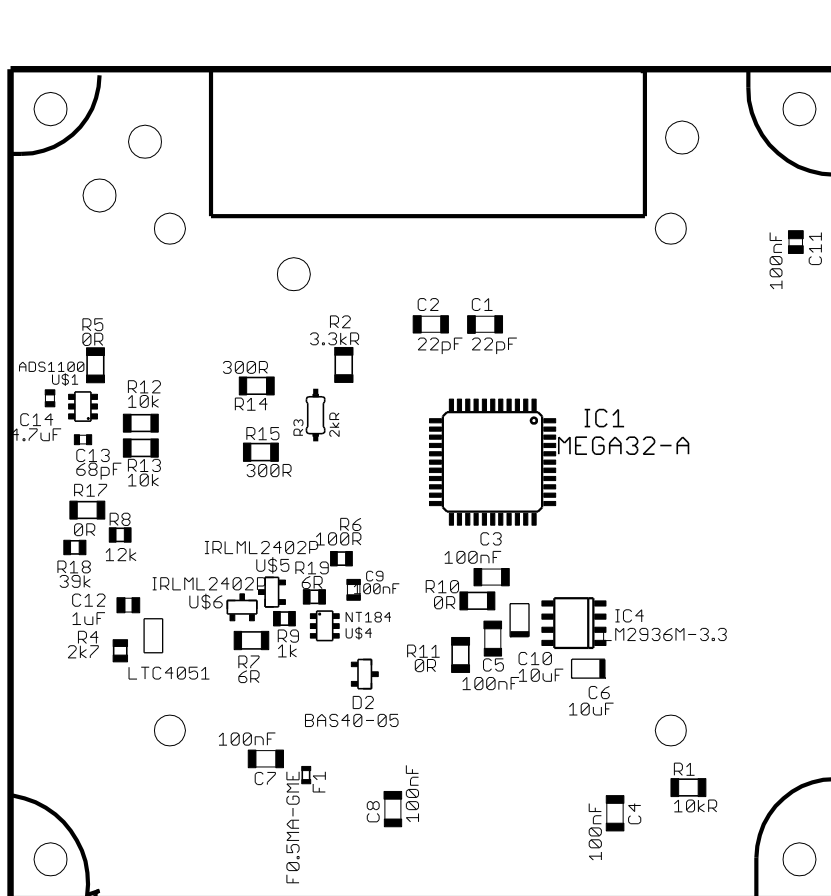
Příloha 9: Osazovací plán součástek horní strany desky

Příloha 10: Předloha spodní strany desky

MANAS/GE_MODUL/BOTTOM/



Příloha 11: Osazovací plán součástek spodní strany desky



Příloha 12: Závislost naměřené hodnoty teploty objektu na vzdálenosti od senzoru

l	t_PM
[m]	[°C]
0,00	35,5
0,10	32,9
0,20	32,2
0,30	31,5
0,40	31,1
0,50	30,3
0,80	30,0
1,00	28,7
1,50	27,3
2,00	26,3
2,50	25,8
3,00	25,4
3,50	25,0
4,00	24,7

Příloha 13: Fotografie hotového výrobku

